

**VŠB-Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2012

Miroslav Morcinek

**VŠB-Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Téma:**

**Harmonické v elektrických sítích**  
Harmonics in Electrical Networks

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Miroslav Morcinek**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Harmonické v elektrických sítích**  
**Harmonics in Electrical Networks**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor problematiky harmonických v elektrických sítích
2. Zdroje harmonických a možnosti jejich snižování
3. Ukázka vyhodnocení harmonických v distribučních sítích

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Santarius P.: Elektromagnetická kompatibilita, Učební texty VŠB-TUO, Ostrava, 2007
2. Normy ČSN
3. Další literatura podle pokynu vedoucího bakalářské práce


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*

  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

Místopřisežně prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 4.5 2012

podpis 

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. za rady a připomínky, které mi dával v průběhu psaní práce.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá důsledky působení harmonických na síť a posuzováním jednotlivých vybraných parametrů distribuční sítě dle normy ČSN EN 50160. Na začátku jsou popsány standardy dodávky elektrické energie. V následujících kapitolách je popsán vznik, měření, důsledky a odstraňování harmonických v síti. V praktické části je vyhodnocení měření v rozvodné síti v daném úseku a porovnání kvality elektrické energie dle normy ČSN EN 50160. Ke srovnání byly použity vybrané parametry kvality elektrické energie ( flickr, nesymetrie, harmonické napětí, činitel zkreslení).

## Klíčová slova

elektrická energie, distribuční soustava, harmonické napětí, kvalita napětí, kolísání napětí, flickr, kmitočet napájecího napětí, nesymetrie napětí, mezipharmonické napětí, elektromagnetická kompatibilita;

## Annotation

This thesis describes the effect of exposure of harmonics...on the net, and considering the certain parameters of distribution network according ČSN EN50160. There are described the norms of power supply in the first chapter. The following chapters describe the creation, measurement, consequences and eliminate of harmonic nets. The practical part includes evaluation of measurement on the grid in the particular section and comparing the quality of the energy according ČSN EN 50160. There was used certain parameters governing the quality of electric energy (flicker, unbalance and harmonic voltage distortion factor) to evaluate the data.

## Keywords

electricalpower, distributiongrid, voltage of harmonics, voltagequality, voltagefluctuation, flicker, voltagefrequency, voltageasymmetry, interharmonicsvoltage, , electromagnetic compatibility,;

## Seznam použitých symbolu a zkratek

ČSN	česká technická norma
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
h	řád harmonické
THD	činitel zkreslení
plt	dlouhá doba vjemu flikru
L1	první fáze
L2	druhá fáze
L3	třetí fáze
Un	jmenovité napětí

## Obsah

<b>1. Úvod</b>	<b>- 1 -</b>
<b>2. Kvalita elektrické energie</b>	<b>- 2 -</b>
2.1 Nízkonapěťové napájecí charakteristiky	- 2 -
2.1.1 Kmitočet sítě	- 2 -
2.1.2 Velikost napájecího napětí	- 3 -
2.1.3 Odchylky napájecího napětí	- 3 -
2.1.4 Míra vjemu flikru	- 3 -
2.1.5 Harmonická napětí	- 3 -
2.1.6 Meziharmonická napětí	- 4 -
2.2 Vysokonapěťové napájecí charakteristiky	- 4 -
2.2.1 Kmitočet sítě	- 4 -
2.2.2 Velikost napájecího napětí	- 5 -
2.2.3 Odchylky napájecího napětí	- 5 -
2.2.4 Míra vjemu flikru	- 5 -
2.2.5 Krátkodobé poklesy napětí	- 5 -
2.2.6 Krátkodobá přerušení napětí	- 5 -
2.2.7 Dlouhodobá přerušení napětí	- 5 -
2.2.8 Harmonická napětí	- 5 -
2.2.9 Meziharmonická napětí	- 6 -
2.3 Napěťové charakteristiky VVN	- 6 -
2.3.1 Kmitočet sítě	- 6 -
2.3.2 Odchylky napájecího napětí	- 7 -
2.3.3 Míra vjemu flikru	- 7 -
2.3.4 Nesymetrie napájecího napětí	- 7 -
2.3.5 Harmonické napětí	- 7 -
<b>3. Teoretický rozbor harmonických v elektrických sítích</b>	<b>- 9 -</b>
3.1 Harmonické	- 9 -
3.2 Druhy tvorby harmonických	- 12 -
3.2.1 Spínané napájecí zdroje (SMPS)	- 13 -
3.2.2 Elektrické předřadníky kompaktních svítidel tzv. CFL	- 13 -
3.2.3 Trojfázové usměrňovače	- 14 -
3.2.4 Ukázka Spotřebičů s rázovým zatížením	- 14 -
3.3 Meziharmonické	- 15 -



3.3.1	Meziharmonické napětí (obdobně pro proud).....	- 16 -
3.3.2	Zdroje.....	- 16 -
3.3.3	Zátěže s hořením oblouku .....	- 16 -
3.3.4	Elektrické pohony s proměnným zatížením .....	- 16 -
3.3.5	Statické měniče, zejména přímé a nepřímé měniče kmitočtu.....	- 17 -
3.3.6	Účinky meziharmonických.....	- 17 -
<b>4.</b>	<b>Problémy způsobené harmonickými.....</b>	<b>- 18 -</b>
4.1	Problémy způsobené harmonickými proudy: .....	- 18 -
4.1.1	Rušení .....	- 18 -
4.1.2	Přetížení středního vodiče.....	- 18 -
4.1.3	Přehřátí transformátoru.....	- 19 -
4.1.4	Rušení při spínání vypínačů .....	- 19 -
4.1.5	Přetěžování kompenzačních kondenzátoru .....	- 19 -
4.1.6	Skinefekt.....	- 19 -
4.2	Problémy způsobené harmonickými napětími:.....	- 20 -
4.2.1	Harmonické zkreslení napětí .....	- 20 -
4.2.2	Indukční motory .....	- 20 -
4.2.3	Poruchy při průchodu nulou.....	- 20 -
<b>5.</b>	<b>Elektromagnetická kompatibilita .....</b>	<b>- 21 -</b>
5.1	Třídy elektromagnetického prostředí.....	- 21 -
5.2	Harmonické .....	- 22 -
5.3	Meziharmonické .....	- 22 -
5.4	Kompatibilní úrovně .....	- 23 -
<b>6.</b>	<b>Harmonická analýza .....</b>	<b>- 25 -</b>
6.1	Výpočtové metody harmonické analýzy .....	- 25 -
6.2	Měřicí metody .....	- 26 -
<b>7.</b>	<b>Měření a hodnocení harmonických .....</b>	<b>- 27 -</b>
7.1	Normalizovaná metoda měření.....	- 27 -
7.2	Velmi krátký interval $T_{vs}$ .....	- 28 -
7.3	Krátký interval $T_{sh}$ .....	- 28 -
7.4	Dlouhý interval $T_L$ .....	- 28 -
7.5	Jednodenní interval $T_D$ .....	- 28 -
7.6	Jednotýdenní interval $T_{wk}$ .....	- 28 -
<b>8.</b>	<b>Přehled analyzátorů BK-Elcom .....</b>	<b>- 29 -</b>

8.1	Přenosné analyzátoři kvality elektřiny .....	- 29 -
8.1.1	PNA560.....	- 29 -
8.1.2	BK 550.....	- 30 -
8.1.3	Model ENA300.....	- 31 -
8.2	Analýzátory kvality elektřiny pro trvalou instalaci .....	- 32 -
8.2.1	ENA400.....	- 32 -
8.2.2	ENA440 .....	- 33 -
<b>9.</b>	<b>Možnosti pro omezení úrovní harmonických .....</b>	<b>- 34 -</b>
9.1	Tlumivky na vstupu nebo ve vloženém obvodu .....	- 34 -
9.2	Impulzní usměrňovače s vyšším počtem impulzů (12,18 a 24) .....	- 34 -
9.3	Pasivní filtry .....	- 34 -
9.4	Aktivní filtry .....	- 35 -
9.4.1	Derivační (paralelní) aktivní filtry .....	- 36 -
9.4.2	Sériové aktivní filtry .....	- 36 -
9.4.3	Kombinované aktivní filtry .....	- 37 -
<b>10.</b>	<b>Ukázka vyhodnocení harmonických v distribuční síti .....</b>	<b>- 38 -</b>
10.1	Vyhodnocené data na hladině nn.....	- 39 -
10.1.1	Míra vjemu flikru .....	- 39 -
10.1.2	Harmonické napětí nn .....	- 40 -
10.1.3	Činitel zkreslení $Thd$ .....	- 41 -
10.1.4	Nesymetrie .....	- 42 -
10.1.5	Vyhodnocení 95 % hodnoty na hladině nn.....	- 43 -
10.2	Vyhodnocené data na hladině vn.....	- 44 -
10.2.1	Míra vjemu flikru .....	- 44 -
10.2.2	Harmonické napětí .....	- 45 -
10.2.3	Činitel zkreslení.....	- 46 -
10.2.4	Nesymetrie .....	- 47 -
10.2.5	Vyhodnocení 95 % hodnot na hladině vn.....	- 48 -
10.3	Vyhodnocené data na hladině vvn .....	- 49 -
10.3.1	Míra vjemu flikru .....	- 49 -
10.3.2	Harmonické napětí .....	- 50 -
10.3.3	Činitel zkreslení.....	- 51 -
10.3.4	Nesymetrie .....	- 52 -
10.3.5	Vyhodnocení 95 % hodnot na hladině vvn.....	- 53 -

<b>Závěr.....</b>	<b>- 54 -</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>- 55 -</b>

## 1. Úvod

Elektrická energie je vyráběna v elektrárnách v normované kvalitě a prostřednictvím rozvodných a distribučních sítí je dodávána jednotlivým odběratelům. Během tohoto přenosu působí na elektrickou energii mnoho vnějších faktorů, které mohou mít vliv na konečnou kvalitu elektrické energie. Jako jsou například: atmosférické vlivy, vlivy způsobené používáním některých elektrických spotřebičů, vlivy způsobené nutnými provozními manipulacemi v síti. S rozvojem různé výpočetní, číslicové a jiné citlivé techniky v profesním i osobním životě, je stále důležitější věnovat se kvalitě dodávané elektrické energie. Elektrická energie, stejně jako jakékoli jiné zboží, má svou předepsanou kvalitu. Proto se měření elektrické energie nesoustřeďuje pouze pro měření napětí a proudu, ale měří se i další veličiny, které souvisejí s kvalitou elektrické energie. Hlavní charakteristiky (meze nebo hodnoty charakteristických hodnot) napětí v místech připojení spotřebitele elektrické energie, jak na distribuční síti nízkého napětí, vysokého napětí nebo velmi vysokého napětí za normálních provozních podmínek, jsou popsány v evropské normě ČSN EN 50160. Předmětem této normy je definování, popis a specifikace charakteristik napájecího napětí týkající se: kmitočtu, velikosti, tvaru vlny, symetrie třífázových napětí.

## 2. Kvalita elektrické energie

Očekávané parametry elektřiny jsou definovány v předávacím místě, tj. v místě jejího přechodu z rozvodného zařízení dodavatele do odběrného zařízení odběratele, čímž je podle vyhlášky č. 169/1995 Sb. § 6, odst. 1 splněna dodávka elektřiny.

Vyhodnocení odchylek technických parametrů dodávané elektrické energie nebo z celkového zásobování od hodnot určených (dohodnutých nebo obecných) - viz ČSN 33 0050-604. V normě ČSN EN 50160 se používá termín charakteristiky dodávky elektrické energie (characteristics of electricity), přičemž do charakteristik jsou zahrnuty:

- Kmitočet sítě
- Velikost napájecího napětí
- Odchyly napájecího napětí
- Rychlé změny napětí
- Krátkodobé poklesy napájecího napětí
- Krátká přerušení napájecího napětí
- Dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- Dočasná přepětí síťového kmitočtu mezi vodiči pod napětím a zemí
- Přechodná přepětí mezi vodiči pod napětím a zemí
- Nesymetrie napájecího napětí
- Harmonické napětí
- Meziharmonická napětí
- Napětí síťových signálů v napájecím napětí

### 2.1 Nízkonapěťové napájecí charakteristiky

#### 2.1.1 Kmitočet sítě

Jmenovitý kmitočet napájecího napětí musí být 50 Hz. Za normálních provozních podmínek musí být střední hodnota kmitočtu základní harmonické měřená v intervalu 10 s v následujících mezích:

U systémů se synchronním připojením k propojenému systému:

50 Hz  $\pm 1$  % (tj. 49,5 Hz ... 50,5 Hz) během 99,5 % roku,  
50 Hz + 4 %/- 6 % (tj. 47 Hz ... 52 Hz) po 100 % času.

U systémů bez synchronního připojení k propojenému systému (tj. ostrovní napájecí systémy):

50 Hz  $\pm 2$  % (tj. 49 Hz ... 51 Hz) během 95 % týdne,  
50 Hz  $\pm 15$  % (tj. 42,5 Hz ... 57,5 Hz) po 100 % času. [8] [9]

### 2.1.2 Velikost napájecího napětí

Normalizované jmenovité napětí  $U_n$  pro veřejnou síť nízkého napětí je:

Pro čtyřvodičové trojfázové soustavy:

$U_n = 230 \text{ V}$ , mezi fázovým a středním vodičem,

Pro třívodičové trojfázové soustavy:

$U_n = 230 \text{ V}$ , mezi fázovými vodiči.

### 2.1.3 Odchyšky napájecího napětí

Za normálních provozních podmínek, s vyloučením přerušení napájení, musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu  $U_n \pm 10 \%$ .

### 2.1.4 Míra vjemu flikru

Za normálních provozních podmínek musí být po 95 % času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra vjemu flikru  $p_{lt} \leq 1$ . Reakce na flikr je subjektivní a může se měnit v závislosti na příčině flikru a na délce doby, po kterou se vyskytuje. V některých případech způsobuje  $p_{lt} = 1$  obtíže, zatímco v jiných případech vyšší hladina  $p_{lt}$  obtíže nevyvolává. [8] [9]

### 2.1.5 Harmonická napětí

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot napětí každé harmonické menší nebo rovno hodnotě uvedené v tabulce 1. U jednotlivých harmonických mohou rezonance způsobit napětí vyšší. Mimoto celkový činitel zkreslení THD napájecího napětí (zahrnující všechny harmonické až do řádu 40) musí být menší nebo roven 8 %.

Omezení do řádu 40 je dohodnuté.

Tabulka 1 Úrovně jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech  $U_n$  pro řády harmonických až do 25.

liché harmonické				sudé harmonické	
ne násobky 3		násobky 3			
řád harmonické h	harmonické napětí %	řád harmonické h	harmonické napětí %	řád harmonické h	harmonické napětí %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25					

POZNÁMKA Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné.

### 2.1.6 Meziharmonická napětí

S rozvojem používání měničů kmitočtu a podobných zařízení hladina meziharmonických narůstá. Hodnoty se v současné době studují a získávají se další zkušenosti.

POZNÁMKA Harmonické a Meziharmonické napětí bude dále řešeno, viz kapitola 3.

## 2.2 Vysokonapěťové napájecí charakteristiky

Odběratelům, jejichž požadavky překračují přenosové možnosti sítě nízkého napětí, je dodávka zpravidla zajištěna dohodnutým napájecím napětím vyšším než 1 kV. Tato norma se vztahuje na takovéto dodávky elektrické energie při dohodnutém napětí až do 36 kV. [8] [9]

### 2.2.1 Kmitočet sítě

U systémů se synchronním připojením k propojenému systému:

50 Hz  $\pm 1$  % (tj. 49,5 Hz ... 50,5 Hz) během 99,5 % roku,  
 50 Hz + 4 %/- 6 % (tj. 47 Hz ... 52 Hz) během 100 % času

U systémů bez synchronního připojení k propojenému systému (tj. ostrovní napájecí systémy):

50 Hz  $\pm 2$  % (tj. 49 Hz ... 51 Hz) během 95 % týdne,  
 50 Hz  $\pm 15$  % (tj. 42,5 Hz ... 57,5 Hz) během 100 % času.

## 2.2.2 Velikost napájecího napětí

Velikost napájecího napětí je dána dohodnutým napájecím napětím  $U_c$ .

## 2.2.3 Odchyšky napájecího napětí

Za normálních provozních podmínek, s vyloučením přerušení napájení, musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu  $U_c \pm 10\%$ .

## 2.2.4 Míra vjemu flikru

Za normálních provozních podmínek musí být po 95 % času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra vjemu flikru  $pl_t \leq 1$ .

## 2.2.5 Krátkodobé poklesy napětí

Očekávaný počet poklesů může být během roku od několika desítek až do jednoho tisíce. Většina poklesů má dobu trvání kratší než 1 sekunda a hloubku poklesu menší než 60%. V některých oblastech se mohou velmi často vyskytovat poklesy s hloubkou mezi 10% - 15%  $U_n$  jako následek spínání zatížení u odběratelů.

## 2.2.6 Krátkodobá přerušení napětí

Roční výskyt krátkodobých přerušení napájecího napětí je v rozsahu od několika desítek až do několika stovek. Přibližně 70 % krátkodobých přerušení může mít dobu trvání menší než 1 sekunda.

## 2.2.7 Dlouhodobá přerušení napětí

Roční četnost poruchových přerušení napětí delších než 3 minuty může být menší než 10, avšak v závislosti na oblasti může dosahovat až hodnot okolo 50. Pro předem dohodnutá a nahlášená přerušení napětí se směrné hodnoty neuvádějí. [8] [9]

## 2.2.8 Harmonická napětí

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot každého jednotlivého harmonického napětí menší nebo rovno hodnotě uvedené v tabulce 2. U jednotlivých harmonických mohou rezonance způsobit napětí vyšší. Mimoto celkový činitel zkreslení THD napájecího napětí (zahrnující všechny harmonické až do řádu 40) musí být menší nebo rovný 8 %.



Omezení do řádu 40 je dohodnuté.

Tabulka 2 Úrovně jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech  $U_n$  pro řády harmonických až do 25.

liché harmonické				sudé harmonické	
ne násobky 3		násobky 3			
řád harmonické h	harmonické napětí %	řád harmonické h	harmonické napětí %	řád harmonické h	harmonické napětí %
5	6	3	5*)	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

\*) V závislosti na druhu sítě mohou být hodnoty třetí harmonické podstatně nižší.  
POZNÁMKA Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné.

## 2.2.9 Meziharmonická napětí

S rozvojem měničů kmitočtu a podobných zařízení hladina meziharmonických narůstá. Hodnoty se v současné době studují a získávají se další zkušenosti.

POZNÁMKA Harmonické a Meziharmonické napětí bude dále řešeno, viz kapitola 3.

## 2.3 Napěťové charakteristiky VVN.

Odběratelům, jejichž požadavky překračují přenosové možnosti sítě vn, je dodávka zpravidla zajištěna dohodnutým napájecím napětím vyšším než 36 kV. Tato norma se vztahuje na takovéto dodávky elektrické energie při dohodnutém napětí až do 150 kV. [8] [9]

### 2.3.1 Kmitočet sítě

Jmenovitý kmitočet napájecího napětí musí být 50 Hz. Za normálních provozních podmínek musí být střední hodnota kmitočtu základní harmonické měřená v intervalu 10 s v následujících mezích:

U systémů se synchronním připojením k propojenému systému:

50 Hz  $\pm 1$  % (tj. 49,5 Hz ... 50,5 Hz) během 99,5 % roku,

50 Hz + 4 %/- 6 % (tj. 47 Hz ... 52 Hz) po 100 % času.

U systémů bez synchronního připojení k propojenému systému (tj. ostrovní napájecí systémy):

50 Hz  $\pm 2$  % (tj. 49 Hz ... 51 Hz) během 95 % týdne,  
50 Hz  $\pm 15$  % (tj. 42,5 Hz ... 57,5 Hz) po 100 % času.

### 2.3.2 Odchytky napájecího napětí

Protože počet uživatelů napájených přímo ze sítě vvn je omezen a obvykle mají individuální smlouvy, neuvádí tato norma žádné limity pro odchytky napětí.

### 2.3.3 Míra vjemu flikru

Za normálních provozních podmínek musí být po 95 % času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra vjemu flikru  $pl_t \leq 1$ .

Tato hodnota byla zvolena za předpokladu, že přenosový koeficient mezi vvn a nn soustavou je 1. V praxi může být přenosový koeficient mezi vvn a nn nižší než 1. V případě stížností musí být limit pro vvn a příslušné snížení pro vvn, vn a nn zvoleno tak, aby hodnota  $pl_t$  pro nn nepřesáhla 1.

### 2.3.4 Nesymetrie napájecího napětí

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 % až 2 % sousledné složky. V některých oblastech se vyskytují nesymetrie až do 3 %. [8] [9]

### 2.3.5 Harmonické napětí

Za normálních provozních podmínek má být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot každého jednotlivého harmonického napětí menší nebo rovno hodnotě uvedené v tabulce 3. U jednotlivých harmonických mohou rezonance způsobit napětí vyšší. Omezení pro každé harmonické napětí se zkoumají.

Omezení na řád 40 je dohodnuté.

*Tabulka 3 Informativní hodnoty jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech  $U_I$  pro řády harmonických až do 25.*

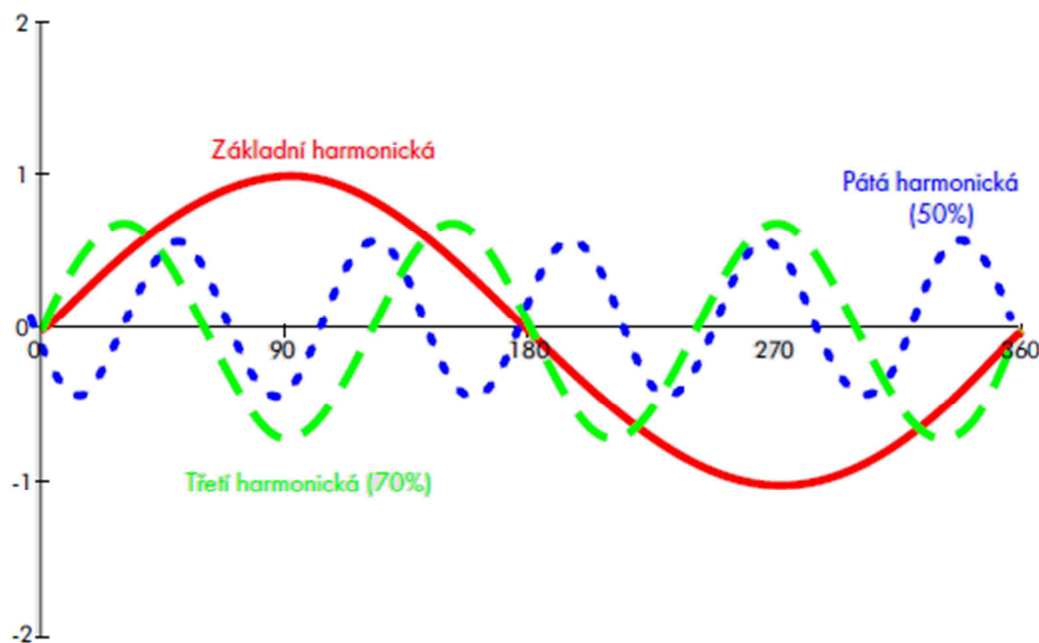
liché harmonické				sudé harmonické	
ne násobky 3		násobky 3			
řád harmonické h	harmonické napětí $U_h$	řád harmonické h	harmonické napětí $U_h$	řád harmonické h	harmonické napětí $U_h$
5	5	3	3	2	1,9
7	4	9	1,3	4	1
11	3	15	0,5	6...24	0,5
13	2,5	21	0,5		
17	zkoumá se				
19	zkoumá se				
23	zkoumá se				
25	zkoumá se				
POZNÁMKA Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné. Uvažují se Informativní hodnoty harmonických (ne násobky 3 ) řádu vyšších než 13. V některých zemích jsou vždy vhodné omezení pro harmonické.					
a) V závislosti na druhu sítě mohou být hodnoty třetí harmonické podstatně nižší.					

POZNÁMKA Harmonické a Meziharmonické napětí bude dále řešeno, viz kapitola 3.

### 3. Teoretický rozbor harmonických v elektrických sítích.

#### 3.1 Harmonické

Za normálních podmínek, by měly spotřebiče odebírat rovnoměrné sinusové napětí, s konstantní amplitudou a frekvencí. V reálu však spotřebiče odebírají ze sítě nesinusový neharmonický zatěžovací proud, který má za následek deformaci sinusovky, odebíraného proudu. Tyto deformace sinusového proudu, se nazývají také zpětné působení na síť. V dnešní době nejčastěji vyhodnocujeme harmonické do výše 2,5 KHz, což odpovídá 50 harmonické. Nejsilnější účinek na síť mají hodnoty 5 a 7 harmonické tedy frekvence od 250Hz do 350Hz. [1]



Obrázek 1 Základní harmonická s třetí a pátou harmonickou [2]

Obecně lze každou funkci, která je periodická [ $f(t) = f(t + T)$ ] nebo periodicky prodloužitelná, rozložit v tzv. Fourierovou řadu (Fourier series), tzn. rozložit na součet periodických jednoduchých funkcí (elementární harmonické funkce sinus a kosinus). [8] [9]

Periodická funkce, Fourierova řada:

Jestliže funkce  $f(x)$  vyhovuje rovnici:

$$f(x) = f(x + 2\pi) = f(x + k \times 2\pi)$$

Nejznámější periodické funkce jsou :

$\sin(\omega t)$  a  $\cos(\omega t)$  kde  $x = \omega t$

pak tuto funkci nazýváme periodickou s periodou  $2\pi$

Pro kmitočet  $f$  je  $\omega = 2\pi f$  a perioda funkce  $T = 1/f = 2\pi/\omega$  pak

$$\sin \omega(t + K \cdot T) = \sin \omega(t + K \frac{2\pi}{\omega}) = \sin(\omega t + 2K\pi) = \sin \omega t \Rightarrow \text{funkce je periodická.}$$

Periodickou funkci lze aproximovat pomocí goniometrického polynomu:

$$\varphi_n(x) = b_0 + \sum_{K=1}^n [a_K \cdot \sin(Kx) + b_K \cdot \cos(Kx)]$$

Pomocí metody nejmenších čtverců:

$$\int_0^{2\pi} [f(x) - \varphi_n(x)]^2 \cdot dx = \int_0^{2\pi} [F]^2 \cdot dx = MIN$$

Neznámé koeficienty se určí z parciálních derivací:

$$\frac{\partial F}{\partial b_0} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial a_K} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial b_K} = 0$$

$$b_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx$$

$$a_K = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin(Kx) dx$$

$$b_K = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos(Kx) dx$$

Pro limitní operaci  $n \rightarrow \infty$  dostaneme rozvoj ve Fourierovu řadu, přičemž periodická funkce musí splňovat tzv. Dirichletovy podmínky tj.: [8] [9]

- funkce musí být omezená
- jejích bodů nespojitostí, maxim a minim je jen konečně mnoho

Pak:

$$f(x) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \sin(nx) + b_n \cdot \cos(nx)]$$

Pro časovou řadu s periodou T.

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \sin(n\omega t) + b_n \cdot \cos(n\omega t)]$$

Posloupnost amplitud jednotlivých harmonických složek nazýváme amplitudovým spektrem a posloupnost jejich fází fázovým spektrem. Pomocí těchto spekter je možno provést zápis Fourierovy řady v komplexním tvaru:

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot \cos(n\omega t - \varphi_n)$$

Kde koeficienty Fourierovy řady

$$c_0 = b_0$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad n=1; 2; \dots$$

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{a_n}{b_n}\right)$$

Pomocí komplexních členů:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \cdot e^{n \cdot j\omega t}$$

$$\text{Kde} \quad c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-n \cdot j\omega t} \cdot dt$$

Necháme-li růst periodu T do nekonečna, přechází vyjádření funkce f(t) ve Fourierův integrál:

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cdot \cos(t - \tau) d\tau$$

[8] [9]

### 3.2 Druhy tvorby harmonických

V moderní nízkonapěťové síti jsou stále více používány nelineární spotřebiče, v síti není sinusový průběh proudu. Tento průběh bude tvořen sinusovým proudem  $I_1$ , jehož frekvence odpovídá frekvenci sítě a proudy harmonických  $I_H$ , jejichž frekvence jsou násobky frekvence sítě. Impedance sítě vyrábí (způsobuje) výpadky napětí na těchto frekvencích, všechny harmonické způsobují zatěžování napájecí sítě. [5]

Lineární spotřebiče jsou:

- ohmické odpory (odporové topení, žárovky atd.)
- třífázové motory

Nelineární spotřebiče (vytvářející harmonické) jsou:

- transformátory a tlumivky
- usměrňovače
- měniče proudu, obzvláště pro třífázové řízení asynchronních motorů
- indukční a obloukové pece, svařovací přístroje
- jednofázové, klíčováné zdroje pro elektrické spotřebiče, jako televizory, videa, počítače, monitory, tiskárny, faxy, kompaktní úsporná světla a podobně

Harmonické frekvence (zpravidla liché) mají různé zdroje původu (například třífázové usměrňovače, digitálně řízené zdroje) a jejich celkový dopad se vyjadřuje veličinami THD.

THD

je veličina definující zkreslení sinusového signálu. Název vychází z anglické zkratky total harmonic distortion, což lze přeložit jako celkové harmonické zkreslení, je definován pro proud i napětí a představuje celkové zkreslení proudu a napětí

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100(\%)$$

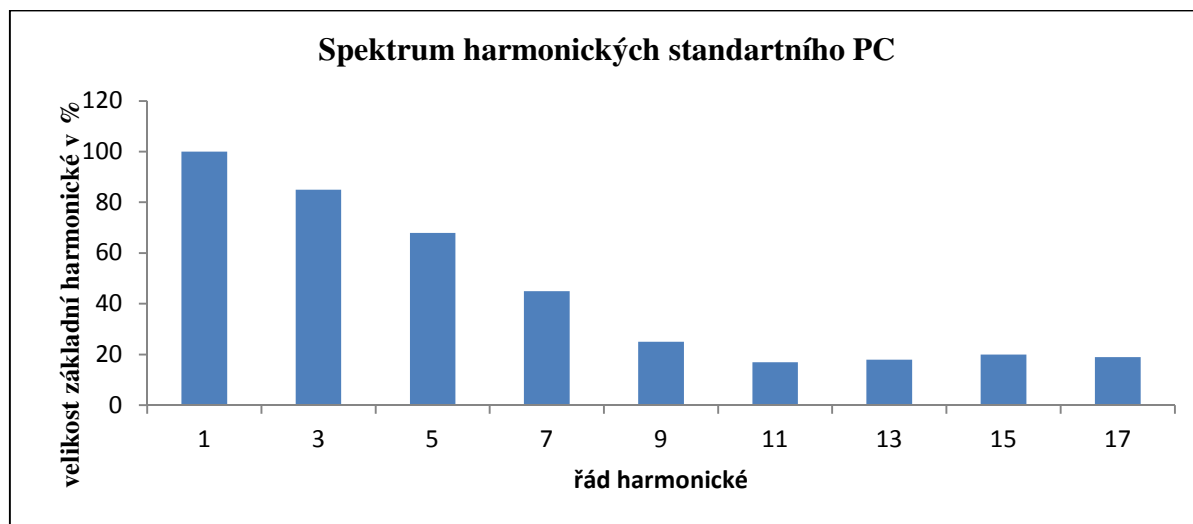
$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \cdot 100(\%)$$

Druhy tvorby harmonických

- spínané napájecí zdroje ( SMPS)
- elektrické předřadníky kompaktních svítidel tzv. CFL
- malé zdroje nepřerušitelného napájení ( UPS )
- elektronické regulační pohony
- trojfázové usměrňovače

### 3.2.1 Spínané napájecí zdroje (SMPS)

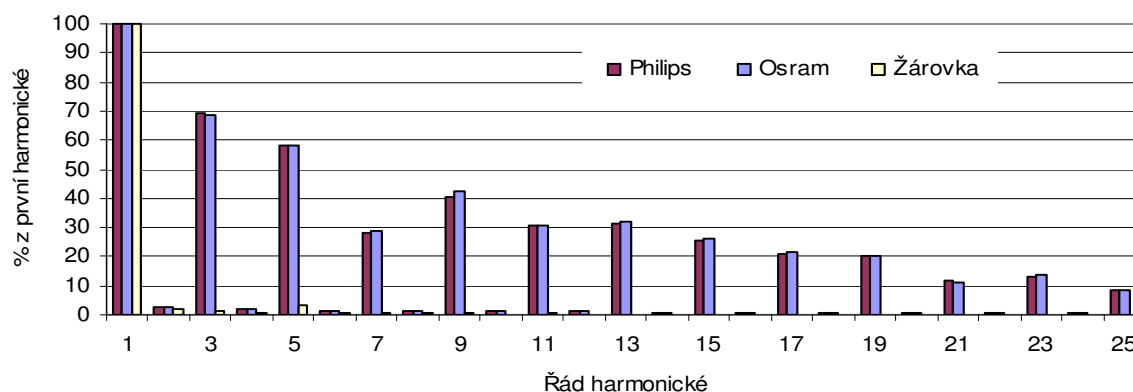
Většina moderních elektronických jednotek používá spínané napájecí zdroje (SMPS). Tradiční redukční transformátory a usměrňovače jsou nahrazeny přímo řízeným usměrňovačem, který nabíjí kondenzátor a ten pak napájí stejnosměrným proudem zátěž. Výhoda pro výrobce zařízení je, že velikost, cena a váha jsou podstatně redukovány a napájecí jednotka může být vyrobena přesně dle požadovaného činitele tvaru. Nevýhoda pro každého je, že zátěž odebírá místo lineárního proudu pulsující proud, který obsahuje velké množství třetí a dalších harmonických řádů a má významný obsah vysokofrekvenční složky. [2]



Obrázek 2 Spektrum harmonických standardního PC

### 3.2.2 Elektrické předřadníky kompaktních svítidel tzv. CFL

Elektronické předřadníky svítidel se v posledních letech staly velmi populárními, protože se díky nim vylepšila účinnost svítidel. Obecně lze konstatovat, že jsou pouze o něco málo účinnější než nejlepší elektromagnetické předřadníky a ve skutečnosti je nutné větší účinnost svítidel přičíst více na vrub tomu, že jsou napájeny vysokou frekvencí. Jejich hlavní výhodou je, že úroveň osvětlení může být zachována zároveň s prodloužením životnosti a to zásluhou regulace se zpětnou proudovou sazbou. Jejich největší nevýhodou je, že generují harmonické v odebraném proudu. [2]

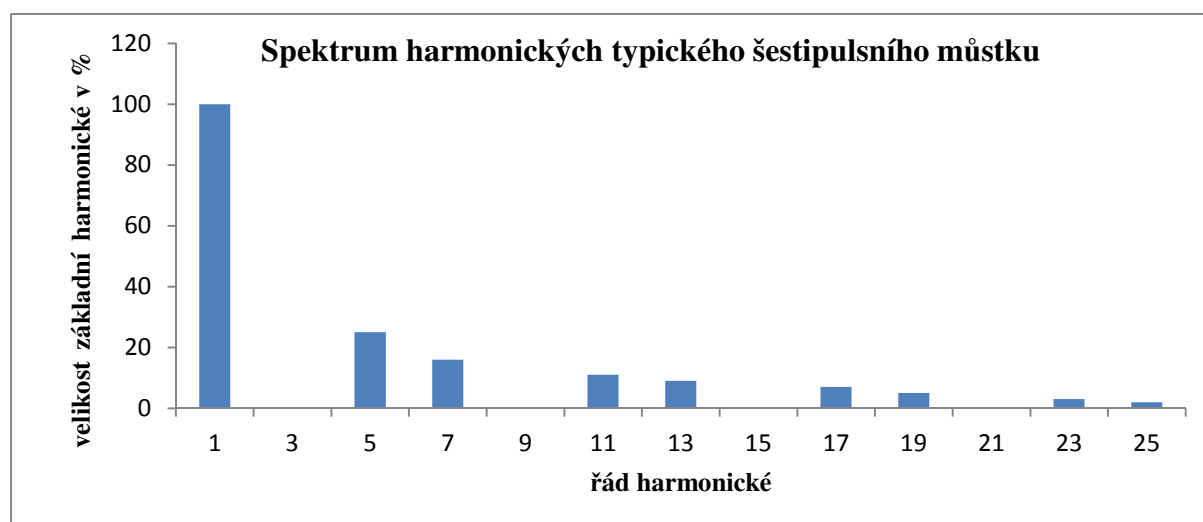


Obrázek 3 Harmonické spektrum CFL a klasické žárovky 100W[10]



### 3.2.3 Trojfázové usměrňovače

Zapojují se do trojfázového můstku a tvoří tzv. šesti pulzní můstek, který generuje harmonické řádu  $6n \pm 1$ . Velikost každé harmonické je teoreticky nepřímo úměrná řádu harmonické ( $I_n = I_1/n$ ). Použitím dvanácti pulzního můstku napájeného z transformátoru se dvěma sekundárními vinutími hvězda-trojúhelník a vzájemným fázovým posunem  $30^\circ$  se harmonické teoreticky redukuje na řády  $12n \pm 1$ . [2]



Obrázek 4 Spektrum harmonických typického šestipulsního můstku

### 3.2.4 Ukázka Spotřebičů s rázovým zatížením

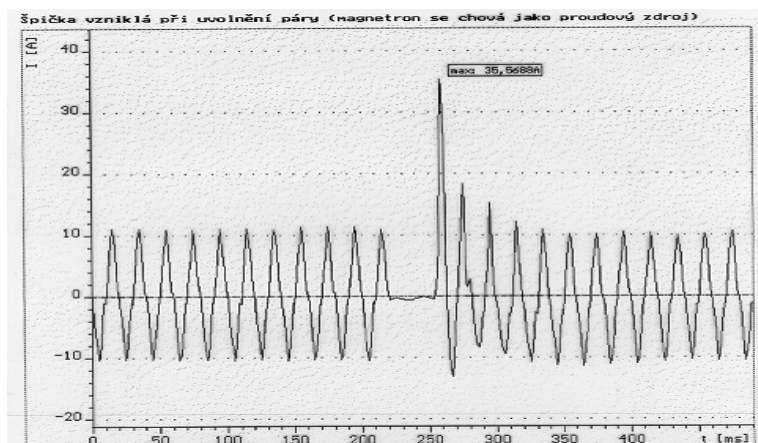
Měření je převzato z:

Závěrečné zprávy Zachování kvality dodávané elektrické energie při nárůstu úrovně rušivých vlivů v distribučních sítích. [10]

U některých spotřebičů dochází při některých provozních stavech ke značnému nárůstu proudu, který může způsobovat nežádoucí úbytky napětí. Jak je ukázáno na příkladech mikrovlnné trouby a monitoru počítače, nemusí být proudový náraz pouze při zapnutí zařízení.

a) mikrovlnná trouba:

Při provozu mikrovlnné trouby dochází k velkým špičkám odběrového proudu při zapnutí (asi 15 A). K ještě větším proudovým špičkám může dojít i při provozu mikrovlnné trouby. Pokud dojde k varu vody, dochází ke změně skupenství v páru. Pokud pára obsažena ve vodě tvoří velké bubliny, které se uvolňují, dochází v tomto momentě k větší spotřebě elektromagnetického vlnění. Zdroj tuto spotřebu má tendenci zajistit a tím dojde k prudkému nárůstu odběrového proudu. Po uvolnění páry odběrový proud klesá na ustálenou hodnotu. Tento případ je zachycen na obr. 5. Proudová špička v tomto případě dosáhla hodnoty přes 35,5A což je o 20A více než při zapínání.[10]

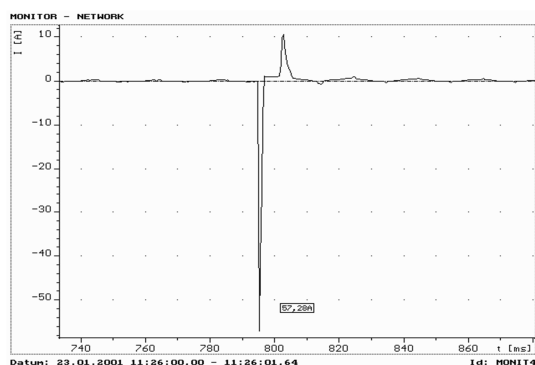


Obrázek 5 Proudová špička při varu vody v mikrovlnné troubě

b) monitory počítačů:

Je zajímavé, že extrémně vysoké hodnoty záběrového proudu vznikly vlivem opakovaného spínání monitoru čímž byl simulován stav opakovaného zapnutí (restartu) počítače. Při prvním sepnutí monitoru byla hodnota záběrového proudu 20 A až 30 A.

Měření bylo prováděno Analyzátozem sítí BK 500 Plus. Analyzátor sítí BK 500 byl inovován s využitím nových systémových prvků na bázi virtuální instrumentace. [10]



Obrázek 6 Opakované zapnutí monitoru Network[10]

### 3.3 Meziharmonické

Jakýkoli kmitočet, který není celočíselným násobkem základního kmitočtu. Řad mezi harmonické je - analogicky k řadu harmonické - dán poměrem mezi harmonického kmitočtu k základnímu kmitočtu. Jde-li o hodnotu nižší než jedna, je daný kmitočet nazýván těž nižší harmonicky kmitočet. Podle doporučení IEC je řad meziharmonické označován písmenem „m“ (dle IEC61000-2-2).

### 3.3.1 Meziharmonické napětí (obdobně pro proud)

Sinusové napětí o kmitočtu, který leží mezi harmonickými, tj. o kmitočtu, který není celočíselným násobkem kmitočtu základní složky.

### 3.3.2 Zdroje

Existují dva základní mechanismy generování meziharmonických. Prvním je generování složek v postranních pásmech kmitočtu napájecího napětí a jeho harmonických v důsledku změn jejich hodnot anebo úhlu fázového posunutí. Druhým mechanismem generování je asynchronní spínání (tj. spínání, které není synchronizováno s kmitočtem energetické soustavy) polovodičových prvků ve statických měničích. Typickými příklady jsou cyklokonvertory a konvertory s pulsně-širokovou modulací (PWM). Meziharmonické mohou být generovány při jakékoli úrovni napětí a přenášejí se mezi jednotlivými úrovněmi, tj. meziharmonické vygenerované v systémech vvn a vn jsou vnášeny do systému nn a naopak. Jejich velikost málokdy přesahuje 0,5% základního harmonického napětí, i když při rezonanci může dojít k vyšším úrovním.

Základní zdroje těchto poruch jsou:

- zátěže s hořením oblouku;
- elektrické pohony s proměnným zatížením;
- statické měniče, zejména přímé a nepřímé měniče kmitočtu;
- hromadné dálkové ovládání (HDO) ;

### 3.3.3 Zátěže s hořením oblouku

Tato skupina zahrnuje obloukové pece a svařovací zařízení. Obloukové pece normálně neprodukují významné meziharmonické, kromě případů, kdy dochází k zesílení vlivem rezonancí. K přechodovému režimu, který je zdrojem meziharmonických, dochází s největší intenzitou během počáteční fáze tavení. [6]

### 3.3.4 Elektrické pohony s proměnným zatížením

Indukční motory mohou být zdrojem meziharmonických vyvolaných drážkami v železe statoru a rotoru, zejména ve spojení s nasycením magnetického obvodu (takzvané „drážkové harmonické“). Při ustálených otáčkách motoru jsou kmitočty rušivých složek obvykle v rozsahu 500 Hz až 2 000 Hz, ale během spouštění se tento rozsah může značně rozšířit. Také vlastní asymetrie motoru (nesouosost rotoru atd.) může být zdrojem meziharmonických.

### 3.3.5 Statické měniče, zejména přímé a nepřímé měniče kmitočtu

Nepřímé měniče kmitočtu obsahují stejnosměrný meziobvod se vstupním měničem na straně napájecí sítě a výstupní měnič (obvykle pracující jako střídač) na straně zátěže. V proudových i napěťových konfiguracích obsahuje stejnosměrný meziobvod filtr, který odděluje proud či napětí napájecího systému a zátěže. Z tohoto důvodu jsou tyto dva základní kmitočty (napájecí a na zátěži) vzájemně oddělené. Neexistuje však ideální odfiltrování a je zde vždy určitá míra vazby. Následkem toho jsou proudové složky spojené se zátěží přítomny ve stejnosměrném meziobvodu a jejich složky jsou přítomny na straně napájení. Tyto složky jsou nižší harmonické a mezipharmonické ve vztahu ke kmitočtu energetické soustavy.

### 3.3.6 Účinky mezipharmonických

Mezipharmonické proudy způsobují mezipharmonické zkreslení napětí v závislosti na velikostech proudových složek a impedanci rozvodné sítě při daném kmitočtu. Čím větší je rozsah kmitočtů proudových složek, tím větší je riziko vzniku nežádoucího rezonančního jevu, který může zvýšit zkreslení napětí a způsobit přetížení nebo poruchy fungování zařízení a instalaci spotřebitelů.

Mezi nejběžnější přímé účinky mezipharmonických patří:

- tepelné účinky
- nízko frekvenční oscilace mechanických soustav
- poruchy fungování zářivek a elektronických zařízení. V praxi může být narušeno fungování jakýchkoli zařízení, která jsou synchronizována vzhledem k nulovému bodu nebo vrcholové hodnotě napájecího napětí
- interference mezi regulačními a ochrannými signály v napájecích elektrických vedeních. To je v současnosti hlavní škodlivý účinek mezipharmonických
- přetížení pasivních paralelních filtrů
- u harmonických vysokého řádu
- rušení telekomunikací
- akustické poruchy
- nasycení transformátorů proudů.

Nejběžnější účinky přítomnosti mezipharmonických jsou kolísání efektivních hodnot napětí a blikání.[6]

## 4. Problémy způsobené harmonickými

### 4.1 Problémy způsobené harmonickými proudy:

- rušení
- přetížení středního vodiče
- přehřátí transformátoru
- rušení při spínání vypínačů
- přetěžování kompenzačních kondenzátoru
- skinefekt
- nárůst chyb měřicích a jisticích přístrojů

#### 4.1.1 Rušení

Přístroje vytvářející harmonické snižují podstatně kvalitu sítě. Elektronicky řízené přístroje pak mohou být rušeny harmonickými, dochází k výpadkům nebo přístroje vykazují "nevysvětlitelné chyby".[5]

#### 4.1.2 Přetížení středního vodiče

Stejnoseměrné napájení pro elektronické přístroje, pro televizory, počítače, periferní zařízení PC a kompaktní úsporná svítidla jsou zdrojem nejvyššího podílu proudů 3. a 9. harmonické.

Dimenzování středního vodiče:

Pokud se v trojfázovém čtyřvodičovém systému objeví ve fázových proudech harmonické složky, pak třetí harmonická a její násobky se chovají jako nulová složka (fázový posuv mezi fázemi je  $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ ) a ve středním vodiči protéká jejich součet, tedy při symetrické harmonické protéká středním vodičem trojnásobek fázové hodnoty třetí harmonické (nebo jejího násobku). Názorně lze tuto situaci ilustrovat na příkladu použití kompaktních svítidel. Při zapojení tří shodných svítidel Philips do čtyřvodičové sítě, byla změřena efektivní hodnota proudu ve fázovém vodiči  $I_f = 145 \text{ mA}$  a ve středním vodiči  $I_{PEN} = 250 \text{ mA}$ . [10]

### 4.1.3 Přehřátí transformátoru

Transformátory jsou harmonickými ovlivňovány dvojím způsobem.

- ztráty vířivými proudy, které jsou normálně okolo 10% ztrát při plném zatížení, rostou s kvadrátem řádu harmonických. Výsledkem toho je u takového transformátoru mnohem vyšší provozní teplota a kratší životnost.
- druhý vliv je spojen s  $3n$  harmonickými. U vinutí zapojeného do trojúhelníka jsou tyto harmonické ve fázi, takže se uzavírají v tomto vinutí a nešíří se do napájecí sítě. Tedy pro  $3n$  harmonické je transformátor zapojený do trojúhelníka jako izolační, přičemž harmonické jiných řádů transformátorem procházejí. Cirkulující  $3n$  harmonické proudy musí být brány v úvahu při stanovení jmenovitého zatížení transformátoru.

### 4.1.4 Rušení při spínání vypínačů

Proudové chrániče vypínají, jestliže je součet proudu ve fázových vodičích a ve středním vodiči mimo nastavené meze. Rušení při spínání těchto vypínačů může být způsobeno harmonickými ze dvou důvodů. Za prvé tyto vypínače jako elektromechanická zařízení nemusí sčítat harmonické složky proudu korektně a proto vypínají chybně. Za druhé, některá zařízení generující harmonické, generují i spínací poruchy, které musí být filtrovány v napájecím obvodu zařízení.

### 4.1.5 Přetěžování kompenzačních kondenzátoru

Kompenzační kondenzátory jsou využívány ke kompenzaci fázového posunutí zpožděného proudu při induktivní zátěži (jako jsou např. indukční motory). Impedance kondenzátoru klesá s kmitočtem, zatímco impedance sítě, která je obecně induktivní, se stoupajícím kmitočtem roste. Proto je kondenzátor více zatěžován harmonickými složkami proudu vyšších řádů, a pokud není individuálně dimenzován, může dojít k poškození kondenzátoru.

### 4.1.6 Skinefekt

Střídavý proud má tendenci protékat okrajovou plochou vodiče. Tento jev je znám jako skinefekt, který se více projevuje na vyšších kmitočtech. Skinefekt je obvykle zanedbáván, protože při základním kmitočtu se projevuje velmi málo, ale u kmitočtu nad 350 Hz, tj. od 7. harmonické a výše, se stává skinefekt významným, protože způsobuje přídavné ztráty a oteplení. [2]

## 4.2 Problémy způsobené harmonickými napětími:

- harmonické zkreslení napětí
- indukční motory
- poruchy při průchodu nulou [2]

### 4.2.1 Harmonické zkreslení napětí

Napětí generované harmonickými proudy způsobuje na vnitřní impedanci zdroje harmonické napětěvé zkreslení napětí sítě. Tj. harmonické napětěvé zkreslení je produktem harmonického proudového zkreslení a impedance zdroje, kde zdroj s největší impedancí vyvolává největší napětěvé zkreslení. Harmonické napětěvé zkreslení může interferovat se zařízením připojeným ke stejnému napájení (např. motory nebo elektronická zařízení) a eventuálně může způsobit poškození tohoto zařízení. Velikost harmonického napětěvého zkreslení je často uváděna v procentech jmenovitého napětí, což se někdy označuje také jako celkové harmonické napětěvé zkreslení (THVD). [7]

### 4.2.2 Indukční motory

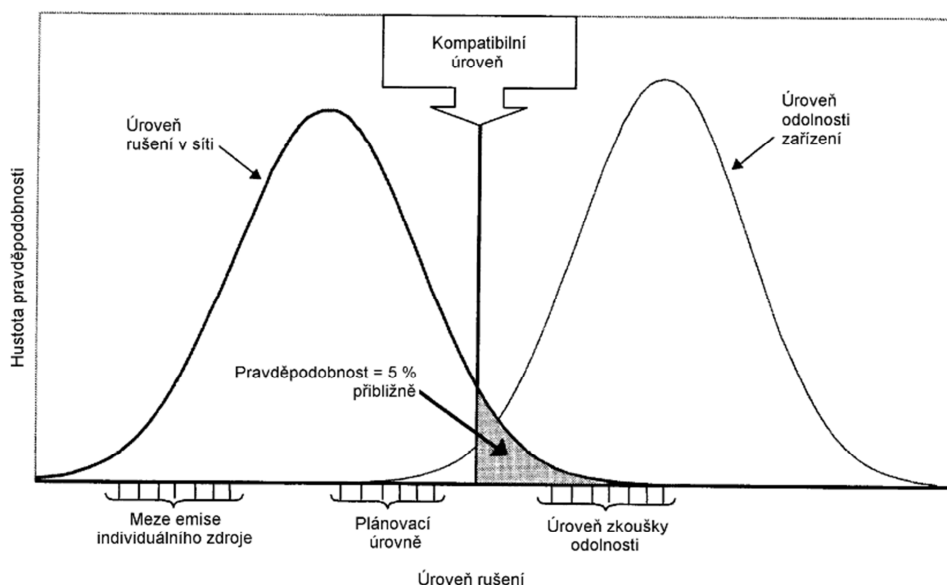
Napětěvé zkreslení způsobuje nárůst ztrát vířivými proudy, podobně jako u transformátoru. Přídavné ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru, z nichž každé se pokouší otáčet motorem různou rychlostí dopředu nebo dozadu. Proudů indukovaných do rotoru na vyšších kmitočtech pak dále zvyšují ztráty. Pokud je očekáván výskyt harmonicky zkresleného napětí, pak by měly být motory dimenzovány s uvažováním přídavných ztrát.

### 4.2.3 Poruchy při průchodu nulou

Mnohé elektronické regulátory určují bod, kdy napájecí napětí prochází nulou, aby stanovily okamžik vypnutí zátěže. Je to dáno tím, že vypínání induktivní zátěže při průchodu nulou nezpůsobuje přechodové jevy a tím se redukuje elektromagnetické interference (EMI) a namáhání polovodičových spínacích zařízení. Jsou-li v napájecím napětí harmonické, nebo přechodové jevy, pak jsou změny napětí při průchodu nulou rychlejší a hůře identifikovatelné, což vede k nepravidelnostem v provozu regulátoru. Muže zde být dokonce i několik průchodu nulou během jedné půlperiody. [2]

## 5. Elektromagnetická kompatibilita

Předepsaná maximální úroveň elektromagnetického rušení, o němž se předpokládá, že bude ovlivňovat přístroje, zařízení nebo systémy provozované v konkrétních podmínkách. V praxi kompatibilní úroveň není absolutní maximální hodnota ale úroveň, která může být překročena s malou pravděpodobností.



Obrázek 7 elektromagnetická kompatibilita. [9]

### 5.1 Třídy elektromagnetického prostředí

Je možné definovat několik tříd elektromagnetického prostředí, ale pro zjednodušení se v této normě uvažují a definují jenom tři.

- Třída 1** Tato třída se týká chráněných napájení a má kompatibilní úrovně nižší než úrovně pro veřejné rozvodné sítě. To se týká použití zařízení velmi citlivého na rušení v napájecí síti, například přístrojového vybavení laboratoří, některých automatizačních a ochranných zařízení, některých počítačů atd.
- Třída 2** tato třída se všeobecně týká bodů PCC a IPC v prostředí průmyslových a jiných neveřejných napájecích sítí. Kompatibilní úrovně této třídy jsou identické s úrovněmi pro veřejné rozvodné sítě. Proto v této třídě průmyslového prostředí mohou být použity prvky navržené pro napájení z veřejných rozvodných sítí.



**Třída 3** Tato třída se týká jenom bodů IPC v průmyslovém prostředí. Tato třída má pro některé jevy rušení vyšší kompatibilní úroveň než třída 2. Tato třída by se měla například uvažovat, když je splněná jakákoliv z následujících podmínek:

- Převážná část zatížení je napájena přes měniče
- Jsou provozovány svářečky
- Velké motory jsou často rozbíhány
- Zatížení se rychle mění

## 5.2 Harmonické

Kompatibilní úroveň pro jednotlivé harmonické složky se musí chápat jako vztažené ke kvazistacionárnímu nebo ustálenému stavu harmonických a jsou uvedeny jako referenční hodnoty jak pro dlouhodobé tak i pro krátkodobé účinky.

Dlouhodobé účinky se hlavně týkají tepelných účinků na kabely, transformátory, motory, kondenzátory, atd. Tyto účinky jsou následkem úrovně harmonických, které trvají 10 minut nebo více.

S ohledem na dlouhodobé účinky jsou kompatibilní úroveň pro jednotlivé harmonické složky napětí uvedeny v tabulkách 4 až 7. Odpovídající kompatibilní úroveň pro celkové harmonické zkreslení jsou uvedeny v tabulce 8.

Velmi krátkodobé účinky se hlavně týkají rušivých účinků na elektrické přístroje, které mohou být citlivé na úroveň harmonických trvajících 3 s nebo méně.

S ohledem na velmi krátkodobé účinky ve třídě 1 a 3 jsou kompatibilní úroveň pro jednotlivé harmonické složky napětí a pro celkové harmonické zkreslení 1,5 násobku hodnot uvedených v tabulkách 4 až 7. Ve třídě 2 jsou kompatibilní úroveň pro jednotlivé harmonické složky napětí hodnoty uvedené v tabulkách 4 až 6 násobené činitelem  $k$ , kde  $k$  se vypočte následovně:

$$k = 1,3 + \frac{0,7}{45} \cdot (h - 5)$$

Odpovídající kompatibilní úroveň pro celkové harmonické zkreslení ve třídě 2 je 8% (THD=8%) pokud jde o velmi krátkodobý účinek.

## 5.3 Meziharmonické

Této normě jsou kompatibilní úroveň uvedeny jen pro meziharmonická napětí vyskytující se na kmitočtu blízko základnímu kmitočtu ( 50 Hz nebo 60 Hz), jejichž následkem je amplitudová modulace napájecího napětí.

## 5.4 Kompatibilní úrovně

Kompatibilní úrovně pro odchylky napětí, nesymetrii napětí a změny síťového kmitočtu jsou uvedeny v níže uvedené tabulce 4. Kompatibilní úrovně pro harmonické jsou uvedeny v tabulkách 5 až 7. Kompatibilní úrovně pro celkové harmonické zkreslení jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 4 Kompatibilní úrovně pro odchylky napětí, nesymetrii a změny síťového kmitočtu.

Rušení	Třída 1	Třída 2	Třída 3
Odchylky napětí vztažené k jmenovitému napětí $U_n$ $\Delta U U_n$	+8%	$\pm 10\%$ <sup>a</sup>	+10% až -15%
Nesymetrie napětí	2%	2%	3%
odchylky kmitočtu sítě <sup>b</sup> $\Delta f$	$\pm 1\text{Hz}$	$\pm 1\text{Hz}$	$\pm 1\text{Hz}$
a hodnota není v IEC 61000-2-2 definovaná b $\pm 2\text{ Hz}$ v případě izolovaných sítí			

Tabulka 5 Kompatibilní úrovně pro harmonické – Harmonické složky napětí Harmonické lichého řádu mimo násobku tři.

Řád h	Třída 1 $U_h \%$	Třída 2 $U_h \%$	Třída 3 $U_h \%$
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
$17 < h \leq 49$	$2,27(17/h)-0,27$	$2,27(17/h)-0,27$	$4,5(17/h)-0,5$
POZNÁMKA V některých případech, kde část průmyslové sítě je vyčleněna pro velké nelineární zátěže, mohou být kompatibilní úrovně třídy 3 pro tuto část sítě 1,2 násobek výše uvedených hodnot. V takových případech by se měla učinit bezpečnostní opatření týkající se odolnosti připojeného zařízení.			

Tabulka 6 Kompatibilní úrovně pro harmonické – Harmonické složky napětí Harmonické lichého řádu, které jsou násobkem tří.

Řád h	Třída 1 $U_h \%$	Třída 2 $U_h \%$	Třída 3 $U_h \%$
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,4	2
21	0,2	0,3	1,75
$21 < h \leq 45$	0,2	0,2	1
POZNÁMKA Tyto úrovně platí pro harmonické nulové symetrické složky. V některých případech, kde část průmyslové sítě je vyčleněna pro velké nelineární zátěže, mohou být kompatibilní úrovně třídy 3 pro tuto část sítě 1,2 násobek výše uvedených hodnot. V takových případech by se měla učinit bezpečnostní opatření týkající se odolnosti připojeného zařízení.			

Tabulka 7 Kompatibilní úrovně - Harmonické složky napětí sudého řádu

Řád h	Třída 1 U <sub>h</sub> %	Třída 2 U <sub>h</sub> %	Třída 3 U <sub>h</sub> %
2	2	2	3
4	1	1	1,5
6	0,5	0,5	1
8	0,5	0,5	1
10	0,5	0,5	1
$10 < h \leq 50$	$0,25(10/h)+0,25$	$0,25(10/h)+0,25$	1
POZNÁMKA V některých případech, kde část průmyslové sítě je vyčleněna pro velké nelineární zátěže, mohou být kompatibilní úrovně třídy 3 pro tuto část sítě 1,2 násobek výše uvedených hodnot. V takových případech by se měla učinit bezpečnostní opatření týkající se odolnosti připojeného zařízení.			

Tabulka 8 Kompatibilní úrovně pro celkové harmonické zkreslení.[14]

	Třída 1	Třída 2	Třída 3
Celkové harmonické zkreslení (THD)	5%	8%	10%
POZNÁMKA V některých případech, kde část průmyslové sítě je vyčleněna pro velké nelineární zátěže, mohou být kompatibilní úrovně třídy 3 pro tuto část sítě 1,2 násobek výše uvedených hodnot. V takových případech by se měla učinit bezpečnostní opatření týkající se odolnosti připojeného zařízení.			

## 6. Harmonická analýza

Při harmonické analýze je nutno mít na zřeteli:

- amplituda základní harmonické je obvykle větší, než amplitudy ostatních harmonických, (zejména u napětí)
- kmitočet základní harmonické může kolísat
- zatím co amplituda základní harmonické napětí je prakticky konstantní, kolísá amplituda základní harmonické proudu často ve značném rozmezí.

Harmonické složky periodického průběhu lze stanovit:

- výpočtem
- měřením

Harmonická analýza může být:

- úplná (určuje amplitudu a fázi všech harmonických)
- neúplná (určuje pouze amplitudy harmonických).

### 6.1 Výpočtové metody harmonické analýzy

Je-li znám analytický průběh periodické funkce, lze přímo vypočítat koeficienty  $a_n$ ,  $b_n$  (resp.  $S_n$ ,  $\varphi_n$ ) harmonických složek. Jinak je nutno použít numerické metody. Pro určení prvních  $p$  koeficientů Fourierova rozvoje rozdělíme interval  $(0, 2\pi)$  periodické funkce  $f(x)$  na  $k$  stejných částí. Dle Shannon - Kotelnikovova teorému volíme  $k \geq 2p$  nejlépe  $k = 4p$

Dostaneme tak  $k+1$  hodnot  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_k$ . Za předpokladu  $y_0 = y_k$  (funkce nemá v počátku nespojitost) lze využít numerickou integraci a pak [9]

$$b_0 = \frac{1}{K} \sum_0^K y_i$$

$$a_n = \frac{2}{K} \sum_0^K y_i \cdot \sin(n \cdot x_i)$$

$$b_n = \frac{2}{K} \sum_0^K y_i \cdot \cos(n \cdot x_i)$$

## 6.2 Měřicí metody

- rezonanční filtry pasivní
- rezonanční filtry aktivní (zesilovače se selektivní zpětnou vazbou
- spektrální analyzátory

POZNÁMKA Bude dále řešeno, viz kapitola 9.

## 7. Měření a hodnocení harmonických

### 7.1 Normalizovaná metoda měření

Měření meziharmonických je obtížné a výsledky závisí na mnoha činitelích, proto jsou činěny pokusy vyvinout metodu „měření“, která by zjednodušila proces měření a poskytovala opakovatelné výsledky. Norma IEC 61000-2-2 navrhuje metodu měření meziharmonických kmitů založenou na koncepci takzvaného „seskupování“ (grouping). Jejím základem je Fourierova analýza prováděná v časovém intervalu rovném 10-ti cyklům základního kmitočtu (50 Hz), tj. přibližně 200 ms. Vzorkování je synchronizováno s napájecím kmitočtem pomocí fázového závěsu. Výsledkem je spektrum s rozlišením 5 Hz. Uvedena norma definuje metodu zpracování jednotlivých 5 Hz čar za účelem určení takzvaných harmonických nebo meziharmonických skupin, na které se odkazují doporučení norem a technických zprav. [9]

#### Základní problémy:

- jak dlouho měřit - 2-3 dny, obvykle týden
- jak často vyhodnocovat - měřicí intervaly
- způsob vyhodnocení - 95% úrovně

#### Měřicí intervaly:

Rozlišujeme „čas sledování“ a „efektivní měřicí čas“:

#### Efektivní měřicí čas:

Odpovídá efektivnímu trvání, uvnitř kterého jsou harmonické měřeny (tj. součet po sobě následujících se časů trvání oken), mezery mezi časy oken, jestliže existují, nejsou započítávány.

#### Čas sledování:

Jde celkový reálný časový úsek odpovídající efektivnímu měřicímu času plus čas mezer v průběhu tohoto času sledování. Doporučuje se používání následujících časových intervalů:

- velmi krátký interval ( $T_{vs}$ ): 3 s
- krátký interval ( $T_{sh}$ ): 10 min
- dlouhý interval ( $T_L$ ): 1 hodina
- jednodenní interval ( $T_D$ ): 24 hodin
- jednotýdenní interval ( $T_{WK}$ ): 7 dní

## 7.2 Velmi krátký interval $T_{vs}$

Interval je chápán jako efektivní měřicí čas a je doporučen v rozsahu 3 s až 10s jestliže jsou dovoleny mezery mezi časy měření. Pro určení okamžitých účinků harmonických by měla být stanovena maximální hodnota  $c_{n_{max}}$  ze všech jednotlivých hodnot v  $T_{vs}$  intervalu. Pro určení dlouhodobých účinků harmonických by měla být stanovena efektivní hodnota dle vztahu:

$$c_{nvs} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M c_{kn}^2}{M}}$$

Ze všech  $M$  jednotlivých vypočtených hodnot  $c_n$  pro celou dobu intervalu  $T_{vs}$  pro jednotlivé volené harmonické.

## 7.3 Krátký interval $T_{sh}$

Interval je chápán jako čas sledování a doporučuje se volit 10 min, alespoň však takový, aby bylo zajištěno minimálně 100 hodnot  $c_n$  během tohoto intervalu.

## 7.4 Dlouhý interval $T_L$

Doporučuje se volit jej rovný 1 nebo 2 hod. [9]

## 7.5 Jednodenní interval $T_D$

Je uvažován jako hlavní při předkládání statických údajů o přehledu harmonických v síťovém napětí. Pro uvažování okamžitých účinků je třeba zaznamenat max. hodnotu ze všech největších hodnot intervalu  $T_{vs}$ . Měla by být vypočtena kumulativní pravděpodobnost 95% ze všech těchto hodnot. Pro uvažování dlouhodobých účinků je třeba zaznamenat v paměti max. hodnotu z efektivních hodnot intervalu  $T_{vs}$ . Měla by být vypočtena kumulativní pravděpodobnost 95% ze všech těchto hodnot.

## 7.6 Jednotýdenní interval $T_{WK}$

Interval je určen pro ukládání dat po dnech. Měl by brát v úvahu velký rozdíl mezi pracovními a volnými dny v týdnu. Užitečné mohou být kumulativní hodnoty 95 % po dobu jednoho týdne a delší. [9]

## 8. Přehled analyzátorů BK-Elcom

Měření v kapitole 10 bylo prováděno přenosným analyzátozem BK PNA 560 firmy ELCOM, proto zde zahrnuji přehled vybraných analyzátorů této firmy.

### Využití analyzátorů:

Kompaktní, jednoduché a zároveň levné analyzátory elektrických sítí využívající nejmodernějších softwarových a hardwarových technologií doplněné o prostředky budování distribuovaných systémů pro monitoring a analýzu kvality elektřiny.

Analyzátor sítí BK-ELCOM tvořící základ systému, je nyní k dispozici v různých hardwarových podobách.

### 8.1 Přenosné analyzátory kvality elektřiny

Přenosné analyzátory kvality elektřiny jsou určeny pro časté používání na různých místech distribuční soustavy na všech napěťových hladinách. Přenosné analyzátory mají velký počet rozsahů na napěťových a proudových vstupech. Proudové se měří proudovými kleštěmi v klasickém provedení s magnetickým obvodem nebo prostřednictvím Rogowského cívky.

#### 8.1.1 PNA560

Analyzátor sítě BK-ELCOM v provedení PNA560 je umístěn v odolném plastovém kufříku. Přístroj umožňuje monitorovat čtyři napěťové a čtyři proudové kanály s možností použití přímého proudového vstupu nebo proudových kleští. Jednoduché ovládání umožňuje vestavěná dotyková obrazovka. Pro snadnou komunikaci s periferními zařízeními je přístroj vybaven rozhraním USB a RS232. Konstrukce přístroje je extrémně mechanicky odolná a vhodná pro měření v terénu. Pro konfiguraci lze také využít dálkové správy prostřednictvím Ethernetu (volitelně bez- drátového) s využitím notebooku. [11] [12]



Obrázek 8 analyzátor PNA 560



## 8.1.2 BK 550

Současná podoba analyzátoru sítí BK550 obsahuje tyto moduly:

- analyzátor FFT pro čtyři napětí a čtyři proudy s kmitočtem 50 Hz nebo 6,25 Hz, pracující do frekvence 2 500 Hz.
- osciloskop pro jednu periodu čtyř napětí a čtyř proudů.
- vektorový diagram čtyř napětí a čtyř proudů na vybrané harmonické.
- monitor energií a výkonů pro čtyři napětí a čtyři proudy, vyhodnocující tyto veličiny:
  - URMS, IRMS,
  - celkové výkony a energie P, Q, S, AP, AQ, AS,
  - výkony a energie na základní harmonické P1, Q1, AP1, AQ1,
  - selektivní integrace odebírané a dodávané činné energie APin, APout,
  - selektivní integrace kapacitní a indukční jalové energie AQC, AQL,
  - celkový účinník PF a účinník na základní harmonické  $\cos \varphi$ ,
  - celkové harmonické zkreslení napětí a proudu THDU, THDI,
  - frekvence;
- měřič míhání (flickermetr) pro tři napětí.
- monitor napětí pro tři napětí, vyhodnocující hlavní charakteristiky napětí v souladu s EN 50160;
- zapisovač rychlých dějů (transientrecorder) pro čtyři napětí a čtyři proudy s pamětí 65 536 vzorků, který pracuje s nastavitelnou vzorkovací frekvencí 6 400 Hz, 12 800 Hz, 25 600 Hz; maximální frekvence je závislá na počtu měřených signálů.
- zapisovač pomalých dějů pro maximálně šestnáct kanálů, vzorkovací frekvence je 1/3 Hz, je určen k monitorování přídatných veličin, např. teploty.

Varianty analyzátoru BK550:

- přenosný průmyslový počítač PC DEWE-2000,
- kompaktní přenosný průmyslový počítač PC DEWE-3000,
- speciální robustní jednoúčelové provedení. [11]

*Obrázek 9 Analyzátor sítí BK550 v provedení DEWE-3000**Obrázek 10 Robustní plastové provedení BK550*

### 8.1.3 Model ENA300

Model ENA300 byl speciálně vyvinut jako cenově přístupné řešení do školních a univerzitních laboratoří. ENA300 se skládá z modulu úpravy signálu a A/D převodníku s USB rozhraním. Model ENA300 nemá vestavěnou procesorovou jednotku a proto musí být připojen přes USB rozhraní k PC s operačním systémem Windows XP na kterém je spuštěn firmware analyzátoru. [11] [12]

*Obrázek 11 analyzátor ENA300*

## 8.2 Analyzátory kvality elektřiny pro trvalou instalaci

Pevně instalované analyzátory (někdy také nazývané jako stacionární analyzátory) jsou určeny pro trvalé monitorování kvality elektřiny např. v rozvodnách mezi předávací a distribuční soustavou.

### 8.2.1 ENA400

ENA400 je ideálním prostředkem pro trvalou instalaci na rozvodnách. Při monitorování kvality elektřiny na několika soustavách tímto jediným přístrojem, se cena za monitoring jedné soustavy stává velmi zajímavou.



*Obrázek 12 analyzátor ENA400*

### 8.2.2 ENA440

ENA440 je ideálním prostředkem pro trvalou instalaci na rozvodnách. Pro konfiguraci lze využít dálkové správy prostřednictvím Ethernetu (volitelně bezdrátového) s využitím notebooku nebo připojení potřebných periférií ke standardním PC rozhraním (monitor, klávesnice a myš).



*Obrázek 13 analyzátor ENA 440*

Další specifikace a typy těchto analyzátorů najdete na <http://www.elcom.cz/virtualni-instrumentace/produkty/bk-elcom> /[11] [12]

## 9. Možnosti pro omezení úrovní harmonických

Obecně lze snížit zpětné účinky elektronických řídicích systému na síť omezením amplitudy impulzních proudů. V důsledku toho dojde ke zlepšení účinnku  $\lambda$ . Aby nedošlo ke značnému zhoršení kvality sítě, je třeba realizovat příslušná opatření k redukci, eliminaci či kompenzaci harmonických u zařízení, která tyto harmonické kmitočty vytvářejí, a sice:

- střídavé tlumivky zapojené na vstup měniče do série s napájecím zdrojem
- stejnosměrné tlumivky zapojené ve stejnosměrném meziobvodu měniče
- použití vícepulzních usměrňovačů, tj. 12, 18 nebo 24-pulzní systémy
- použití usměrňovače s pulzně šířkovým řízením ve struktuře měniče namísto neřízeného diodového
- vstupní pasivní filtry harmonických
- aktivní filtry
- napájení z oddělených zdrojů nebo z vyhrazených transformátorů

### 9.1 Tlumivky na vstupu nebo ve vloženém obvodu

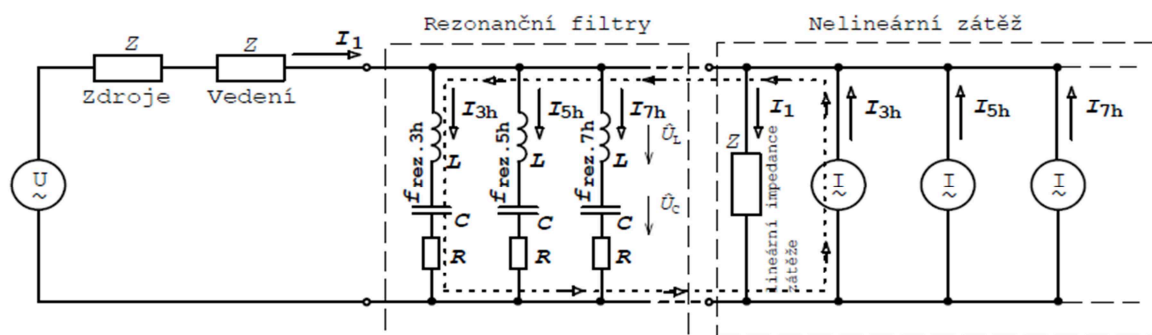
Již jednoduché tlumivky snižují efektivně harmonické, které dodává zapojení usměrňovače do sítě. Tlumivky je možno zapojit před měnič kmitočtu na straně napájení nebo do vloženého obvodu za usměrňovač. Protože indukčnost vyvolá na každém místě stejný účinek, je možné potlačit působení na síť v místě zapojení. Obě varianty mají své výhody i nevýhody. Tlumivky na síťové straně jsou drahé, větších rozměrů a vykazují vyšší ztráty než tlumivky v usměrňovači. Výhoda tlumivek: chrání usměrňovač před přenosem rušivých vlivů ze sítě do měniče. Stejnosměrné tlumivky jsou zapojeny ve vloženém obvodu. Mají větší účinnost, ale obvykle je není možné dodatečně vestavět. Pomocí takových tlumivek lze snížit obsah harmonických z hodnoty THD  $I = 80 \%$  na cca  $40 \%$ .

### 9.2 Impulzní usměrňovače s vyšším počtem impulzů (12, 18 a 24)

Impulzní usměrňovače s vyšším počtem impulzů (12, 18 a 24) vytvářejí menší množství harmonických. V minulosti se často používaly u zařízení s vyššími výkony. K napájení je ovšem potřeba zvláštní transformátor, který má několik sekundárních vinutí, ze kterého přivádí fázově posunutá napětí k jednotlivým skupinám usměrňovače. Nevýhodou tohoto způsobu je vedle nákladů a potřeby prostoru pro zvláštní transformátor také vyšší investice za transformátor a měnič kmitočtu.

### 9.3 Pasivní filtry

V případě mimořádně vysokých požadavků, popř. požadavku na provoz bez harmonických, jsou optimální pasivní síťové filtry. Tyto filtry se vyrábí z pasivních součástek, jako jsou cívky a kondenzátory. Sériové rezonanční obvody zapojené paralelně k zátěži a naladěné na harmonické kmitočty snižují obsah harmonických na straně sítě.



Obrázek 14 Schéma filtrace harmonických proudů paralelními rezonančními filtry

Při rezonanci platí:

$$X_L = X_C$$

$$\frac{f_{rez}}{f_N} \cdot \omega \cdot L = \frac{1}{\frac{f_{rez}}{f_N} \cdot \omega \cdot C} \Rightarrow f_{rez} = \frac{f_N}{\omega \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Kde

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

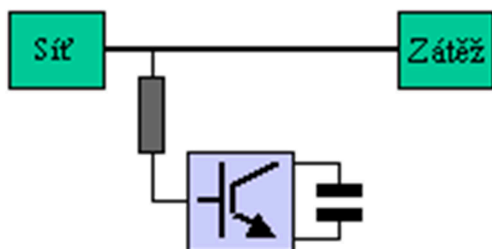
$X_L$  a  $X_C$  jsou indukční a kapacitní reaktance pro základní harmonickou. [13]

## 9.4 Aktivní filtry

Pro některé druhy spotřebičů vytvářejících vyšší harmonické jsou optimálním řešením odlišné kompenzační metody korekce kvality sítě. K tomu slouží aktivní filtry analyzující proud vyšších harmonických od nelineárních spotřebičů a dodávající proti fázový kompenzační proud pro celkové spektrum od 2. do 25. harmonické nebo na cíleně navolenou harmonickou. Odpovídající proud vyšších harmonických bude v připojovacím bodě tak zcela neutralizován. [4]

### 9.4.1 Derivační (paralelní) aktivní filtry

Aktivní paralelní filtr je zapojen paralelně ke svorkám sítě a svorkám spotřebiče a je tvořen generátorem proudu. Tento filtr umožňuje upravit výstupní proud na požadovaný tvar.

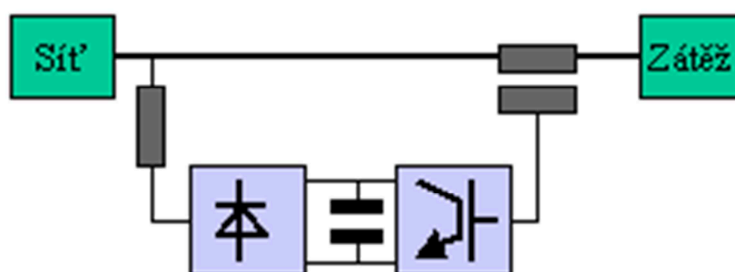


Obrázek 15 Schéma zapojení derivačního aktivního filtru

### 9.4.2 Sériové aktivní filtry

Podobně jako upravuje paralelně zapojený filtr proud, je zde upravováno napětí. To znamená, že filtr má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, odstraňovat harmonické, zajišťovat symetrické rozložení napětí, ale také dodávat energii při výpadku napájecího napětí (za podmínky, že je filtr napájen nezávislým zdrojem).

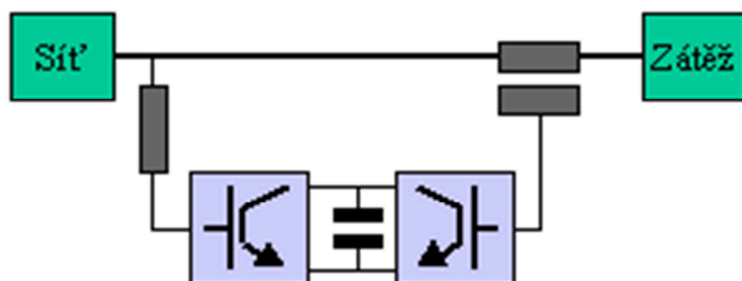
Z popsaných vlastností obou způsobů zapojení je zřejmé, že derivační filtry upravují vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji (vyrovnávají rušivé účinky zátěže). Sériové filtry potom upravují síť směrem od napájecí strany ke spotřebiči, tzn. že, dodávají zátěži kvalitnější energii.



Obrázek 16 Schéma zapojení sériového aktivního filtru.

### 9.4.3 Kombinované aktivní filtry

Oba způsoby je možné zkombinovat v jeden celek a tím vznikne systém zajišťující jak vhodné napětí v místě připojení filtru, tak i definovaný odebíraný průběh proudu. [12]



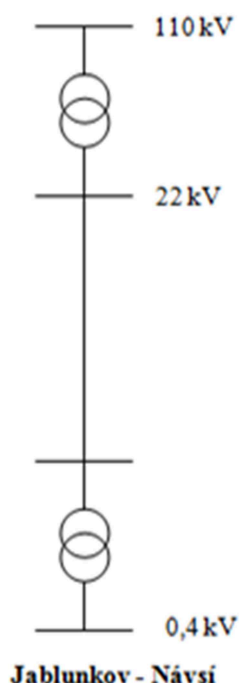
Obrázek 17 Schéma zapojení kombinovaného aktivního filtru.



## 10. Ukázka vyhodnocení harmonických v distribuční síti

Existuje řada důvodů proč provádět výpočty harmonické analýzy rozvodných sítí elektrizační soustavy. Tím nejčastějším důvodem je zejména potřeba provádět kontrolu napětí harmonických u zařízení projektovaných a nově připojovaných v tzv. společném napájecím bodu. Kompatibilní úroveň harmonických složek napětí a činitele zkreslení napětí předepisují normy IEC 1000-2-2, PNE 33 3430 a ČSN EN 50160.

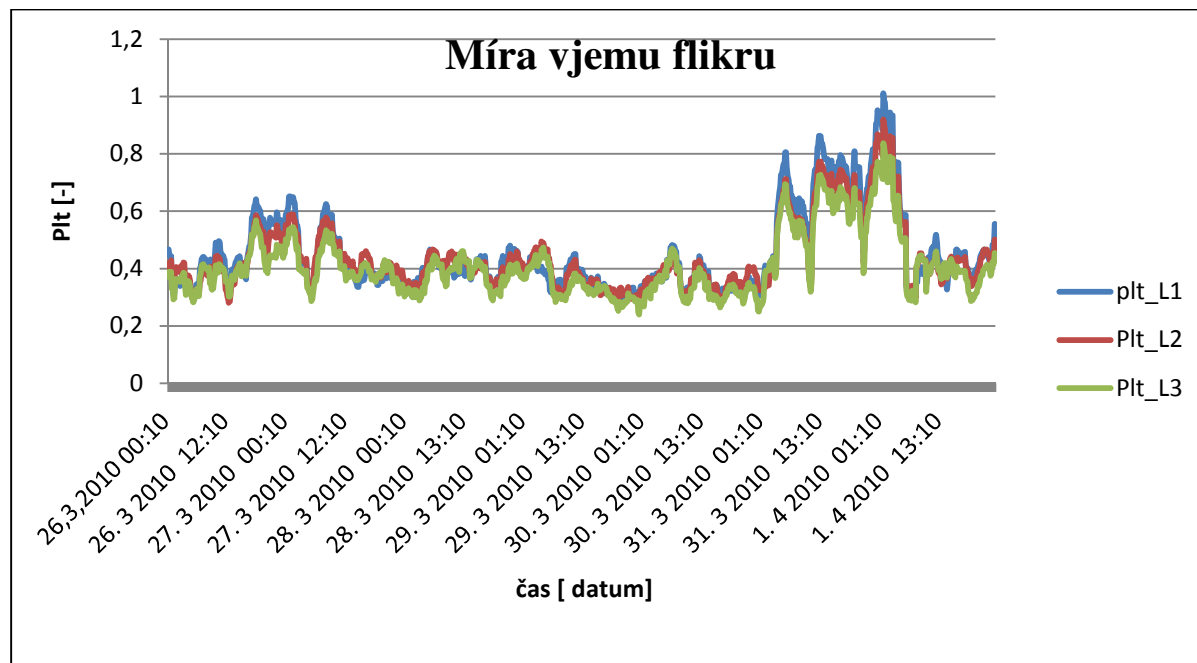
Z provedených měření jsem zvolil týdenní úsek pro vyhodnocení, už zmíněných norem. Monitorování sítě bylo provedeno na napěťových hladinách zvolené distribuční soustavy Obr.:18 od nízkého napětí (nn), přes vysoké napětí (vn) až po velmi vysoké napětí (vvn). Naměřené data byly zpracovány v programu BK-report, který je dodáván se síťovým analyzátozem. Z důvodu charakteru dat, je vhodné použít tzv. tabulkového procesoru ( MS Excel ).



Obrázek 18 Schéma vedení v lokalitě měření

## 10.1 Vyhodnocené data na hladině nn

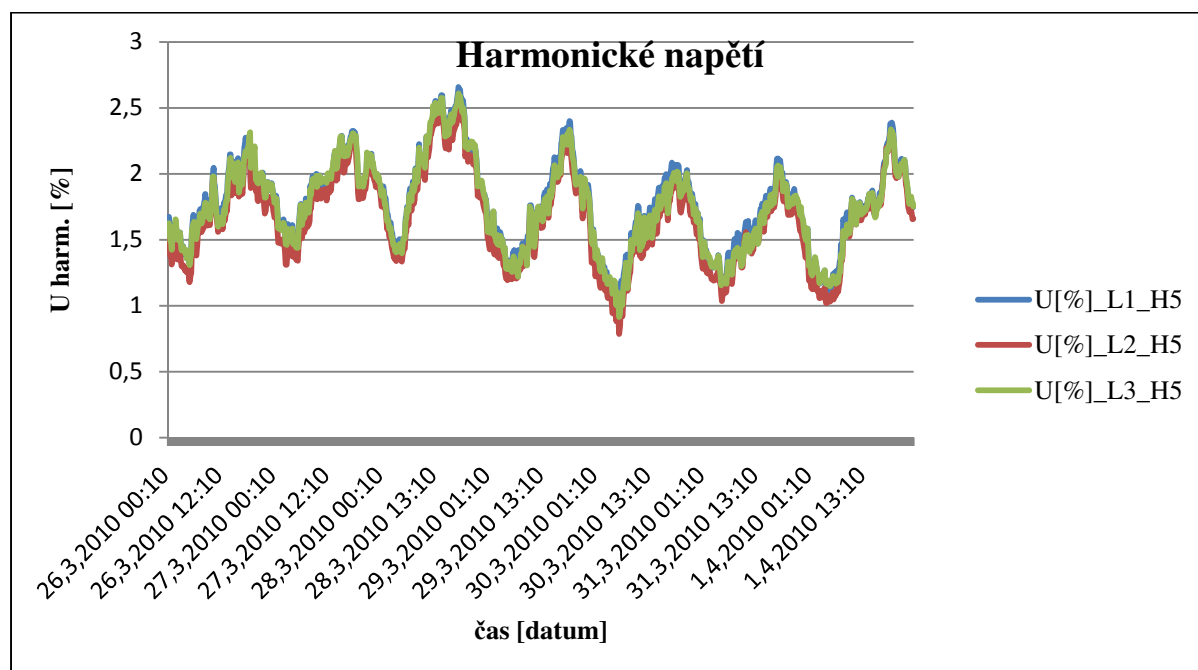
### 10.1.1 Míra vjemu flikru



**Obrázek 19** Míra vjemu flikru (nn)

Za normálních provozních podmínek musí být po dobu 95% času, v libovolném týdenním intervalu dlouhodobá míra vjemu flikru  $plt \leq 1$ . Hodnocená oblast splnila předepsané hodnoty pro dlouhodobou míru vjemu flikru. Maximální hodnoty, kterou flikr dosáhl, byla 1,0 a 95% hodnoty flikru v jednotlivých fázích byly  $L1=0,80$ ;  $L2=0,74$  a  $L3=0,68$ .

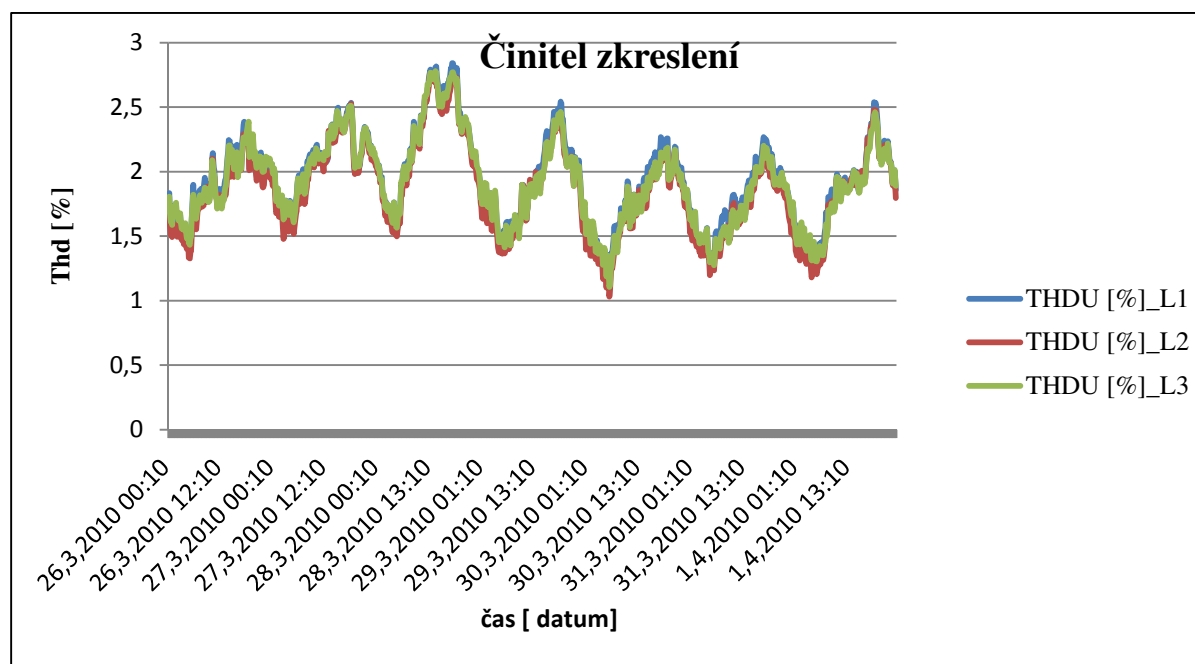
### 10.1.2 Harmonické napětí nn



Obrázek 20 5 Harmonická napětí (nn)

Ukázka největší hodnoty harmonické Obr.:20. Vyhodnocení je provedeno na základních lichých harmonických napětích od 3. po 25 harmonickou, z dat je následovně vytvořena tabulka pro porovnání tabulka 9.

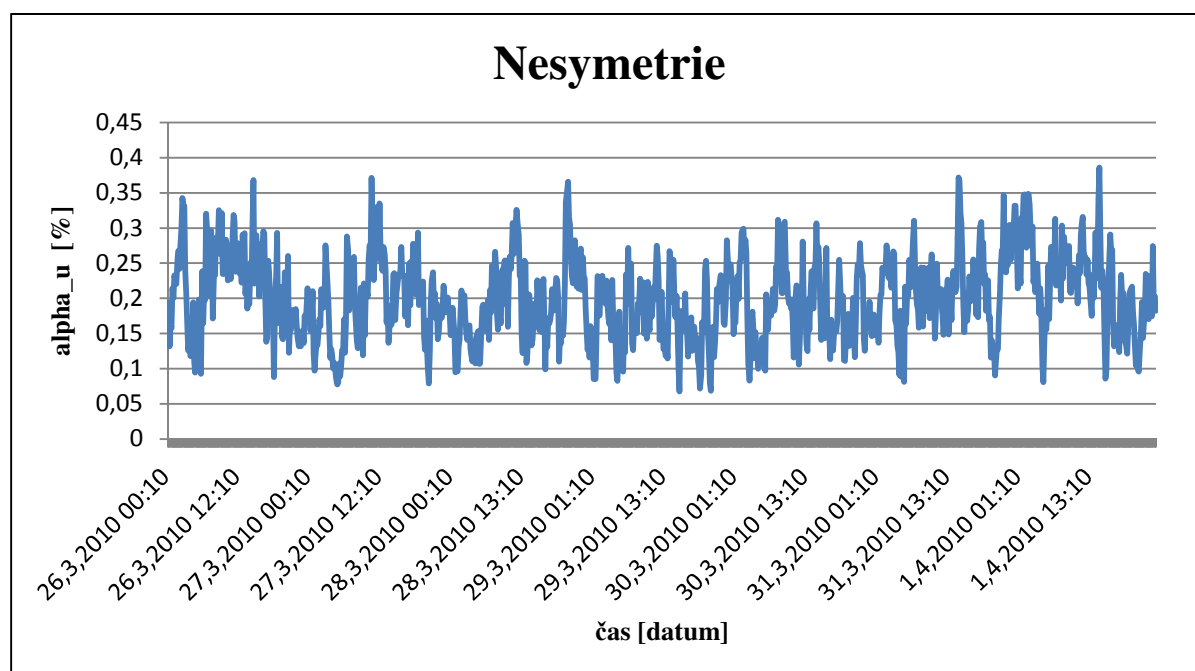
### 10.1.3 Činitel zkreslení Thd



Obrázek 21 Činitel zkreslení THD (nn)

V libovolném týdenním období za normálních provozních podmínek musí být střední efektivní hodnota napětí činitele zkreslení  $\leq 8\%$ . Maximální hodnota byla v první fázi 2,84 % a 95 % hodnoty ve fázi L1=2,65 %; L2=2,55 % a L3=2,60 % to znamená, že daný měřený úsek vyhověl normám.

### 10.1.4 Nesymetrie



Obrázek 22 nesymetrie (nn)

Za běžných provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95% hodnot v 10. minutových středních efektivních hodnot zpětné složky napětí v rozsahu 0-2% sousledné složky, maximální hodnota byla 0,38 sousledné složky a 95% hodnota 0,29%.

### 10.1.5 Vyhodnocení 95 % hodnoty na hladině nn

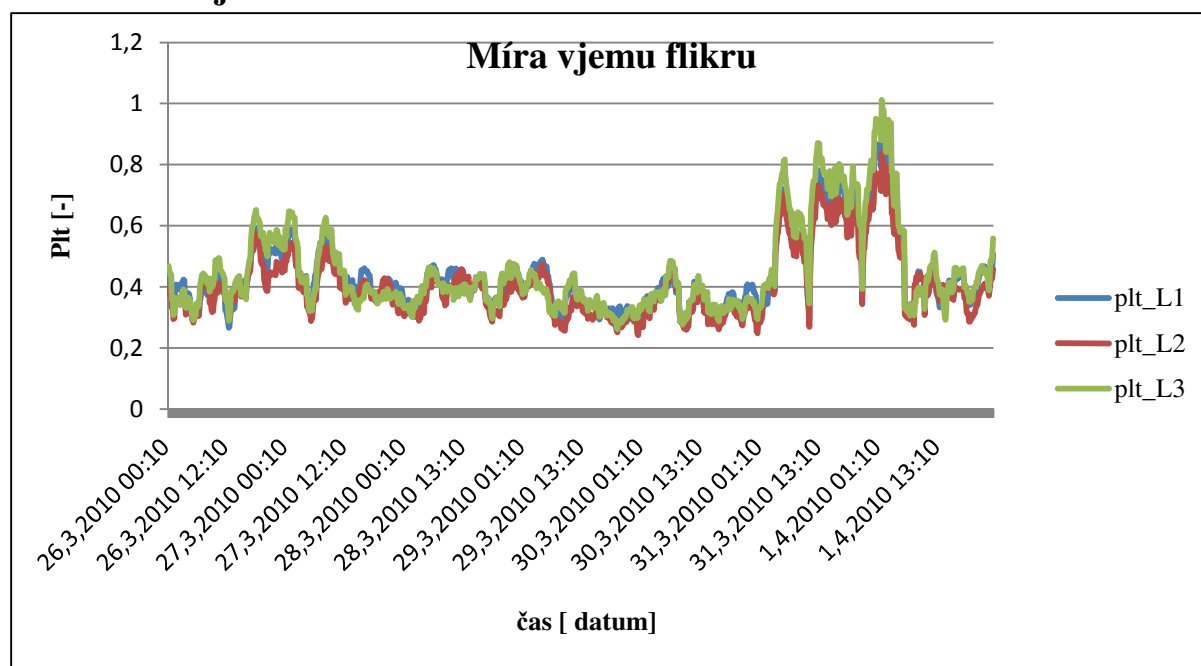
Tabulka 9 Souhrn vyhodnocovaných 95% hodnot na hladině nn

Harmonické									
Řád	U harm %	Fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160	Řád	U harm %	Fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160
3	5	L1	0,27	vyhovuje	15	0,5	L1	0,06	vyhovuje
		L2	0,48	vyhovuje			L2	0,08	vyhovuje
		L3	0,31	vyhovuje			L3	0,04	vyhovuje
5	6	L1	2,25	vyhovuje	17	2	L1	0,07	vyhovuje
		L2	2,14	vyhovuje			L2	0,10	vyhovuje
		L3	2,22	vyhovuje			L3	0,07	vyhovuje
7	5	L1	0,78	vyhovuje	19	1,5	L1	0,07	vyhovuje
		L2	0,74	vyhovuje			L2	0,08	vyhovuje
		L3	0,74	vyhovuje			L3	0,07	vyhovuje
9	1,5	L1	0,11	vyhovuje	21	0,5	L1	0,03	vyhovuje
		L2	0,18	vyhovuje			L2	0,04	vyhovuje
		L3	0,10	vyhovuje			L3	0,04	vyhovuje
11	3,5	L1	0,50	vyhovuje	23	1,5	L1	0,05	vyhovuje
		L2	0,50	vyhovuje			L2	0,07	vyhovuje
		L3	0,50	vyhovuje			L3	0,05	vyhovuje
13	3	L1	0,42	vyhovuje	25	1,5	L1	0,05	vyhovuje
		L2	0,43	vyhovuje			L2	0,05	vyhovuje
		L3	0,44	vyhovuje			L3	0,04	vyhovuje

Činitel zkreslení					
	Mez dle ČSN EN 50160	jednotka	fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160
thd	≤8%	[ % ]	L1	2,65	vyhovuje
			L2	2,55	vyhovuje
			L3	2,60	vyhovuje
Míra vjemu flikru					
plt	≤1	[ - ]	L1	0,80	vyhovuje
			L2	0,74	vyhovuje
			L3	0,68	vyhovuje
Nesymetrie					
alpha_u	0-2	[ % ]		0,29	vyhovuje

## 10.2 Vyhodnocené data na hladině vn

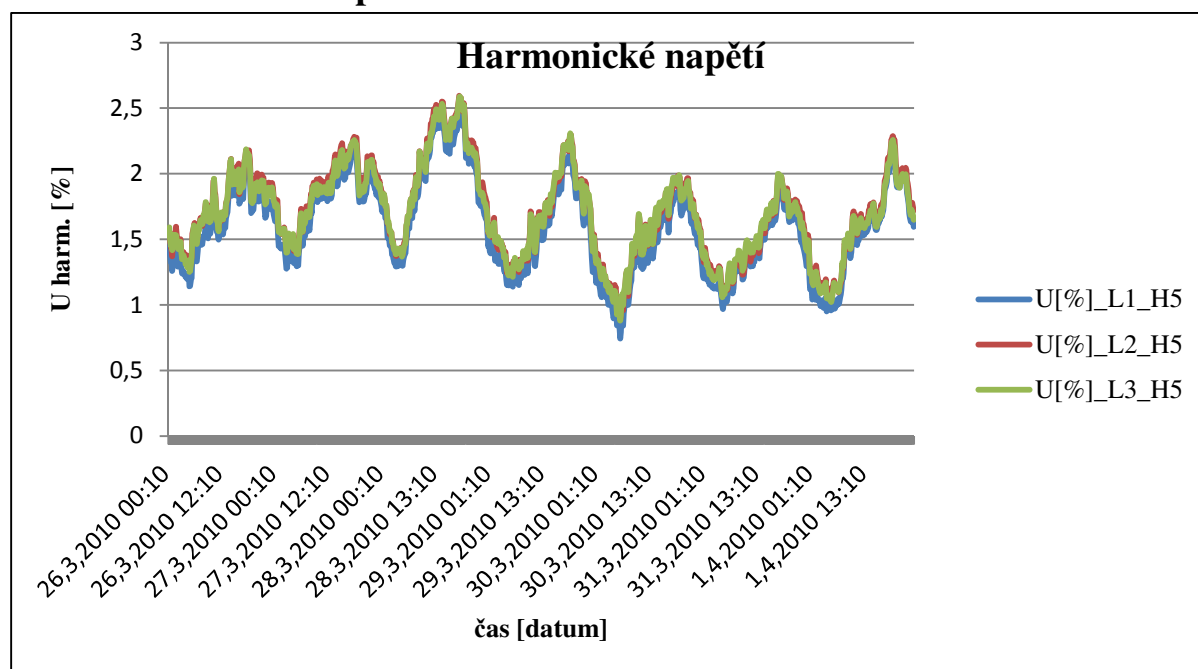
### 10.2.1 Míra vjemu flikru



Obrázek 23 Míra vjemu flikru ( vn )

Za normálních provozních podmínek musí být po dobu 95% času, v libovolném týdenním intervalu dlouhodobá míra vjemu flikru  $plt \leq 1$ . Hodnocená oblast splnila předepsané hodnoty pro dlouhodobou míru vjemu flikru. Maximální hodnoty, kterou flikr dosáhl, byla 1,0 a 95% hodnoty flikru v jednotlivých fázích byly  $L1=0,74$ ;  $L2=0,68$  a  $L3=0,8$ .

## 10.2.2 Harmonické napětí

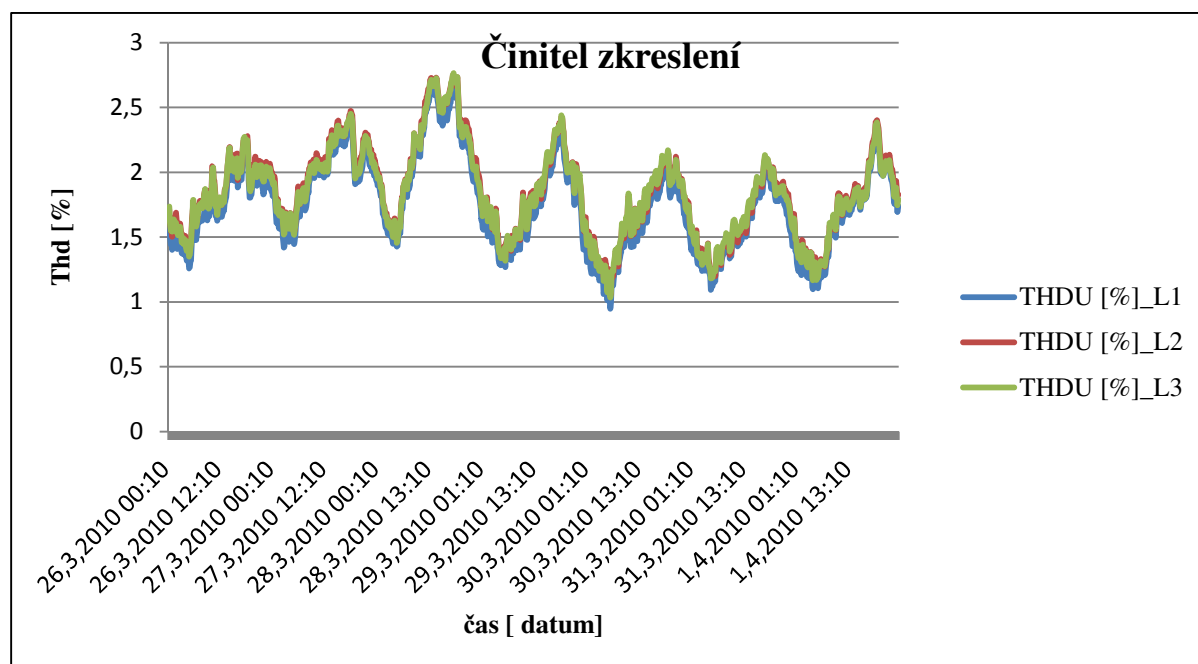


Obrázek 24 5 Harmonická napětí ( vn )

Ukázka největší hodnoty harmonické Obr.:24. Vyhodnocení je provedeno na základních lichých harmonických napětích od 3. po 25 harmonickou, z dat je následovně vytvořena tabulka pro porovnání tabulka10.



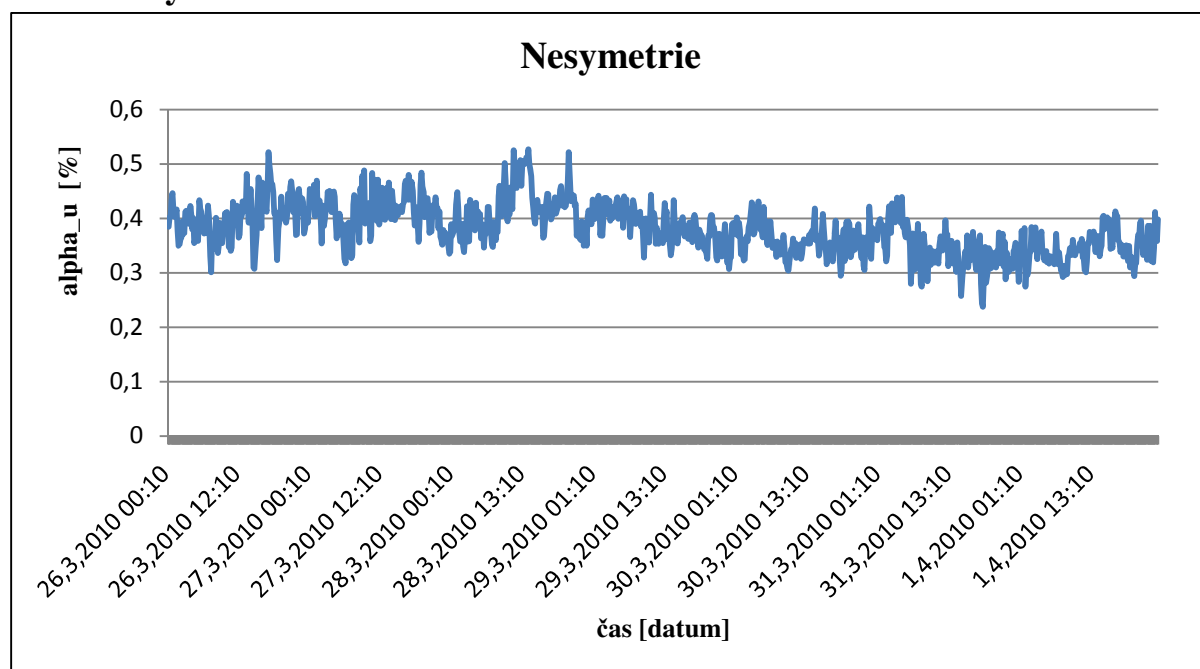
### 10.2.3 Činitel zkreslení



Obrázek 25 Činitel zkreslení ( vn )

V libovolném týdenním období za normálních provozních podmínek musí být střední efektivní hodnota napětí činitele zkreslení  $\leq 8\%$ . Maximální hodnota byla v třetí fázi 2,76% a 95 % hodnoty ve fázi L1=2,45 %; L2=2,56 % a L3=2,56 % to znamená, že daný měřený úsek vyhověl normám.

### 10.2.4 Nesymetrie



Obrázek 26 Nesymetrie ( vn )

Za běžných provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95% hodnot v 10. minutových středních efektivních hodnot zpětné složky napětí v rozsahu 0-2% sousledné složky, maximální hodnota byla 0,5% sousledné složky a 95% hodnota 0,46%.

**10.2.5 Vyhodnocení 95 % hodnot na hladině vn**

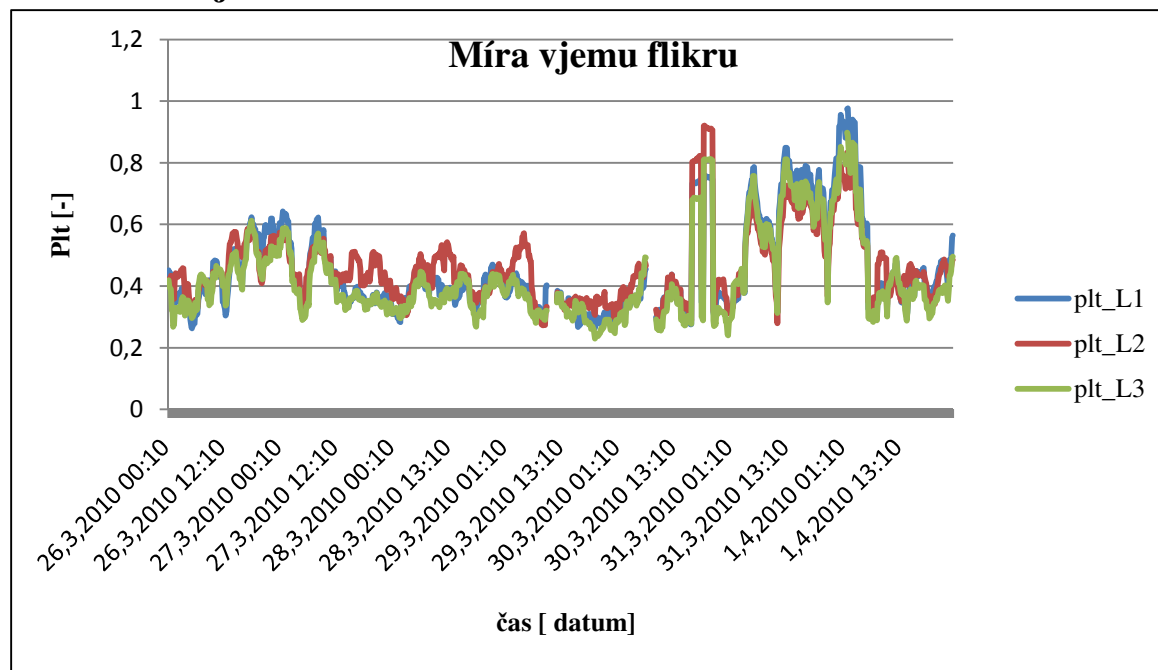
Harmonické									
Řád	U harm %	Fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160	Řád	U harm %	Fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160
3	5	L1	0,30	vyhovuje	15	0,5	L1	0,32	vyhovuje
		L2	0,26	vyhovuje			L2	0,02	vyhovuje
		L3	0,07	vyhovuje			L3	0,02	vyhovuje
5	6	L1	2,07	vyhovuje	17	2	L1	0,07	vyhovuje
		L2	2,16	vyhovuje			L2	0,06	vyhovuje
		L3	2,14	vyhovuje			L3	0,06	vyhovuje
7	5	L1	0,72	vyhovuje	19	1,5	L1	0,06	vyhovuje
		L2	0,71	vyhovuje			L2	0,05	vyhovuje
		L3	0,76	vyhovuje			L3	0,05	vyhovuje
9	1,5	L1	0,03	vyhovuje	21	0,5	L1	0,03	vyhovuje
		L2	0,03	vyhovuje			L2	0,01	vyhovuje
		L3	0,03	vyhovuje			L3	0,01	vyhovuje
11	3,5	L1	0,38	vyhovuje	23	1,5	L1	0,01	vyhovuje
		L2	0,37	vyhovuje			L2	0,06	vyhovuje
		L3	0,40	vyhovuje			L3	0,05	vyhovuje
13	3	L1	0,42	vyhovuje	25	1,5	L1	0,05	vyhovuje
		L2	0,42	vyhovuje			L2	0,03	vyhovuje
		L3	0,42	vyhovuje			L3	0,03	vyhovuje

Činitel zkreslení					
	Mez dle ČSN EN 50160	jednotka	fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160
thd	≤8%	[ % ]	L1	2,46	vyhovuje
			L2	2,56	vyhovuje
			L3	2,56	vyhovuje
Míra vjemu flikru					
Plt	≤1	[ - ]	L1	0,74	vyhovuje
			L2	0,68	vyhovuje
			L3	0,8	vyhovuje
nesymetrie					
alpha_u	0-2	[ % ]		0,46	vyhovuje

Tabulka 10 Souhrn vyhodnocovaných 95% hodnot na hladině vn

## 10.3 Vyhodnocené data na hladině vvn

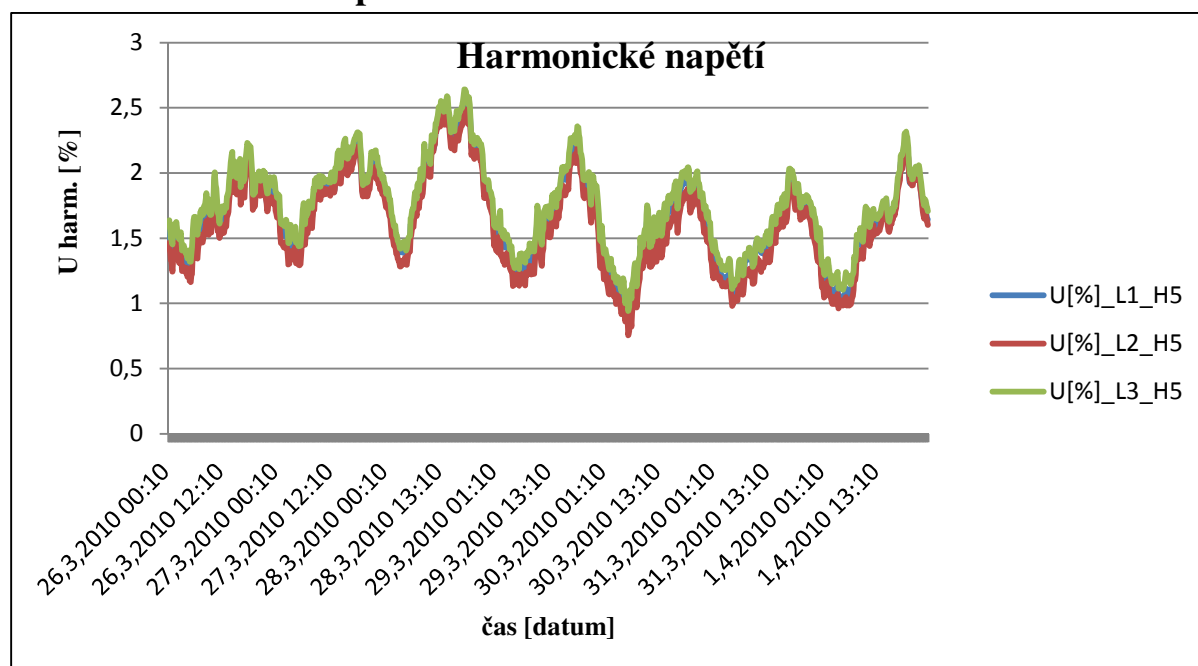
### 10.3.1 Míra vjemu flikru



Obrázek 27 Míra vjemu flikru ( vvn )

Za normálních provozních podmínek musí být po dobu 95% času, v libovolném týdenním intervalu dlouhodobá míra vjemu flikru  $plt \leq 1$ . Hodnocená oblast splnila předepsané hodnoty pro dlouhodobou míru vjemu flikru. Maximální hodnoty, kterou flikr dosáhl, byla 0,97% a 95% hodnoty flikru v jednotlivých fázích byly  $L1=0,97$ ;  $L2=0,92$  a  $L3=0,89$ .

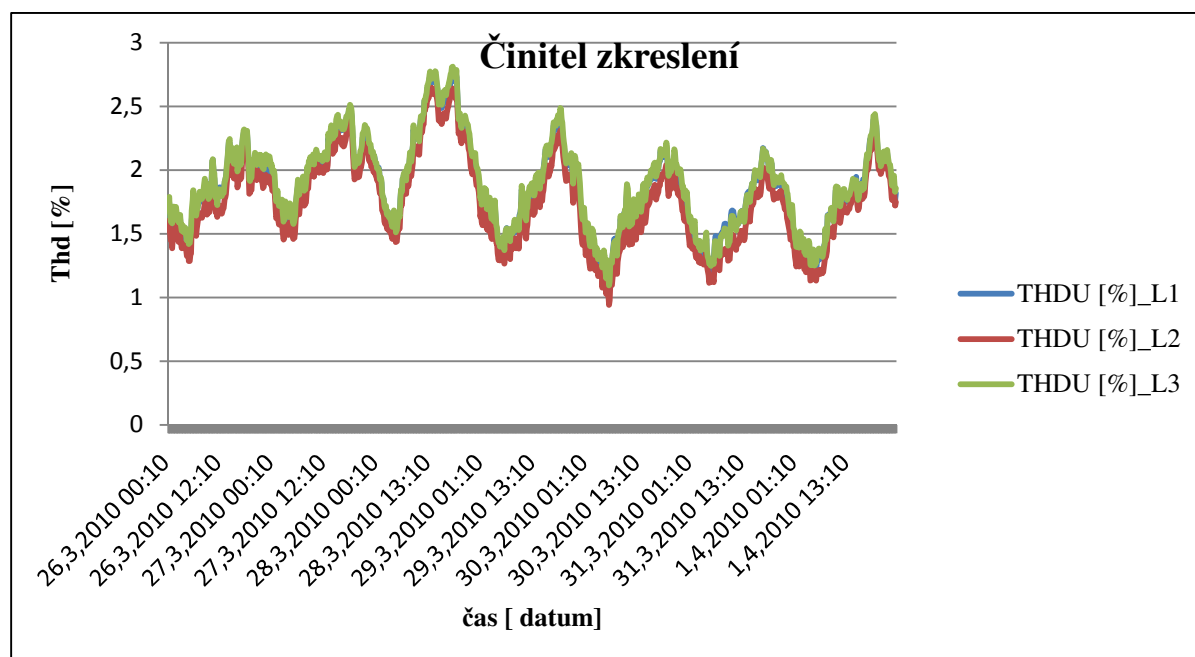
### 10.3.2 Harmonické napětí



Obrázek 28 5 Harmonická napětí ( vvn )

Ukázka největší hodnoty harmonické Obr.:28. Vyhodnocení je provedeno na základních lichých harmonických napětích od 3. po 25 harmonickou, z dat je následovně vytvořena tabulka pro porovnání tabulka 11.

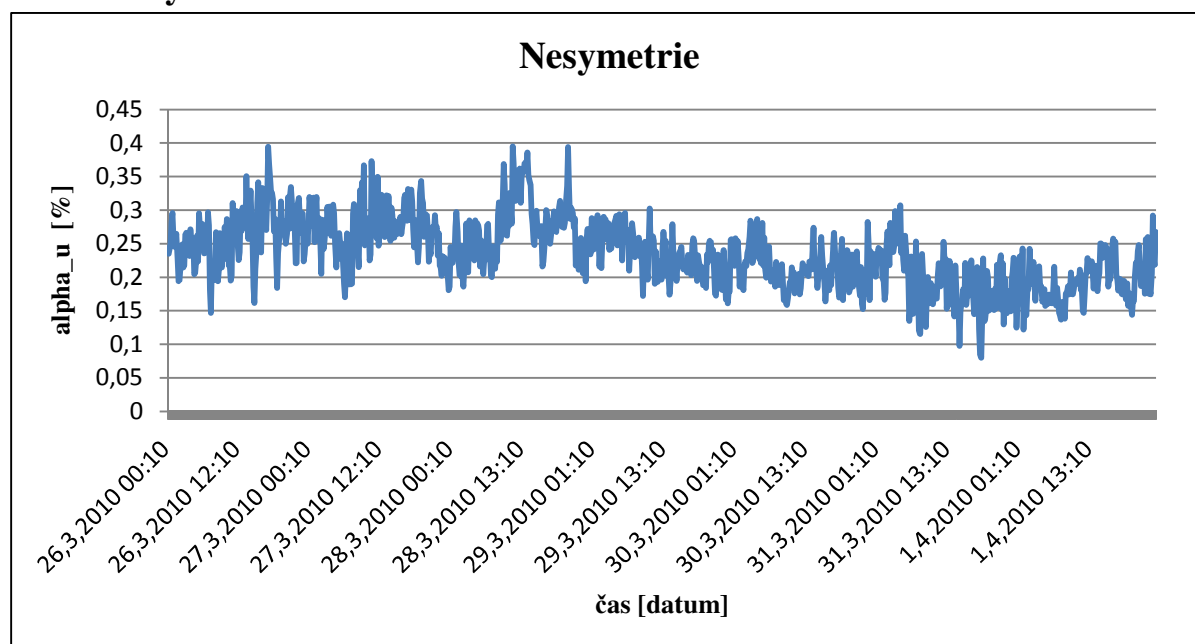
### 10.3.3 Činitel zkreslení



Obrázek 29 Činitel zkreslení ( vvn )

V libovolném týdenním období za normálních provozních podmínek musí být střední efektivní hodnota napětí činitele zkreslení  $\leq 2,5\%$ . Maximální hodnota byla v třetí fázi 2,76% a 95 % hodnoty ve fázi L1=2,44 %; L2=2,34 % a L3=2,47 % to znamená, že daný měřený úsek vyhověl normám.

### 10.3.4 Nesymetrie



Obrázek 30 Nesymetrie

Za běžných provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95% hodnot v 10. minutových středních efektivních hodnot zpětné složky napětí v rozsahu 0-2% sousledné složky, maximální hodnota byla 0,39% sousledné složky a 95% hodnota 0,33%.

**10.3.5 Vyhodnocení 95 % hodnot na hladině v<sub>vn</sub>**

Harmonické									
Řád	U harm %	Fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160	Řád	U harm %	Fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160
3	3	L1	0,29	vyhovuje	15	0,5	L1	0,10	vyhovuje
		L2	0,33	vyhovuje			L2	0,05	vyhovuje
		L3	0,18	vyhovuje			L3	0,02	vyhovuje
5	5	L1	2,07	vyhovuje	17	zkoumá se	L1	0,11	zkoumá se
		L2	2,17	vyhovuje			L2	0,11	zkoumá se
		L3	2,15	vyhovuje			L3	0,16	zkoumá se
7	4	L1	0,74	vyhovuje	19	zkoumá se	L1	0,11	zkoumá se
		L2	0,67	vyhovuje			L2	0,06	zkoumá se
		L3	0,72	vyhovuje			L3	0,06	zkoumá se
9	1,3	L1	0,06	vyhovuje	21	0,5	L1	0,10	vyhovuje
		L2	0,07	vyhovuje			L2	0,07	vyhovuje
		L3	0,03	vyhovuje			L3	0,01	vyhovuje
11	3	L1	0,38	vyhovuje	23	zkoumá se	L1	0,14	zkoumá se
		L2	0,39	vyhovuje			L2	0,11	zkoumá se
		L3	0,40	vyhovuje			L3	0,06	zkoumá se
13	2,5	L1	0,33	vyhovuje	25	zkoumá se	L1	0,13	zkoumá se
		L2	0,44	vyhovuje			L2	0,06	zkoumá se
		L3	0,43	vyhovuje			L3	0,03	zkoumá se

Činitel zkreslení					
	Mez dle ČSN EN 50160	jednotka	fáze	95% hodnoty	Norma ČSN EN 50160
thd	≤2,5	[ % ]	L1	2,44	vyhovuje
			L2	2,34	vyhovuje
			L3	2,47	vyhovuje
Míra vjemu flikru					
Plt	≤1	[ - ]	L1	0,97	vyhovuje
			L2	0,92	vyhovuje
			L3	0,89	vyhovuje
nesymetrie					
alpha_u	0-2	[ % ]		0,33	vyhovuje

Tabulka 11 Souhrn vyhodnocovaných 95% hodnot na hladině v<sub>vn</sub>



## Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá důsledky působení harmonických na síť a posuzováním jednotlivých vybraných parametrů distribuční sítě dle norem ČSN EN 50160. Na začátku jsou popsány standardy dodávky elektrické energie. V následujících kapitolách je popsán vznik, měření, důsledky a odstraňování harmonických v síti. Praktická část je zaměřená na vyhodnocení naměřených dat. Tyto data byla naměřená v týdenním časovém úseku od 26.3 2010 do 2.4 2010 v 10 min intervalech. Měřeny byly hladiny napětí nn, vn a vvn v lokalitě Jablunkov. Vyhodnocovány byly liché (3,5,7,9,...25) harmonické, základní harmonické. Ke srovnání byly použity vybrané parametry kvality elektrické energie (flikr, nesymetrie, harmonické napětí činitele zkreslení).

Dle posuzovaných parametrů, dle normy ČSN EN 50160. Daný měřený úsek vyhověl normativním parametrům. Dlouhodobá míra vjemu flikru, nepřesáhla maximální přípustnou hodnotu  $\leq 1$ , ani na jedné z hladin napětí. Míra činitele harmonického zkreslení a nesymetrie napětí je rovněž na vybrané lokalitě udržována ve stanovených mezích. Největší naměřená hodnota harmonického zkreslení byla naměřena v první fázi na hladině nn a to 2,60 %. Proti tomuto ideálu působí mnoho rušivých vlivů, které mají za následek zhoršení kvality elektrické energie vyráběné v elektrárnách. Nejčastěji to jsou přírodní jevy a provozování nelineárních spotřebičů. Požadavky spolehlivosti a kvality dodávané elektrické energie je často diskutované téma. Vývoj nových technologií a sledování elektrické energie představuje důležitý proces v zjišťování případných problémů s dodávkou elektrické energie a jejich odstraňování.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1]. <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37250.pdf>
- [2]. [http://www.medportal.sk/files/file/3\\_1\(1\).pdf](http://www.medportal.sk/files/file/3_1(1).pdf)
- [3]. <http://spotreba-elektricka-energie.meraky.eu/analyzatory-kvality-elektricke-energie-thd.php?lang=SK>
- [4]. <http://www.danfoss.com/NR/ronlyres/53FF6F8B-EFA4-475D-BFE1-6DF8C12C5C53/0/HVACnewsletter3.pdf>
- [5]. <http://www.pronix.cz/web2/produkty/upload/aktivni%20filtry%20cz.pdf>
- [6]. [http://www.medportal.sk/files/file/lpq\\_cz/3\\_1\\_1.pdf](http://www.medportal.sk/files/file/lpq_cz/3_1_1.pdf)
- [7]. <http://www.mmspektrum.com/clanek/filtry-vyssich-harmonickych-zkresleni.html>
- [8]. ČSN EN 50 160 PNE 33 3430
- [9]. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA Prof. Ing. Pavel SANTARIUS, CSc.
- [10]. Zachování kvality dodávané elektrické energie při nárůstu úrovně rušivých vlivů v distribučních sítích Prof. Ing. Pavel SANTARIUS, CSc.
- [11]. [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=36632](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36632)
- [12]. <http://www.elcom.cz/virtualni-instrumentace/produkty/bk-elcom/>
- [13]. [http://www.pronix.cz/aktivni\\_filtry.html](http://www.pronix.cz/aktivni_filtry.html)
- [14]. ČSN EN 61000-2-4